

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Extracção semi-automática tridimensional dos principais elementos de um perfil rodoviário a partir de dados LiDAR

Inês de Oliveira Falcão

Dissertação

Mestrado em Engenharia Geográfica

2012

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Extracção semi-automática tridimensional dos principais elementos de um perfil rodoviário a partir de dados LiDAR

Inês de Oliveira Falcão

Dissertação

Mestrado em Engenharia Geográfica

Orientador: Prof. Dr. João Carlos da Costa Catalão Fernandes (FCUL)

2012

Resumo

O sistema LiDAR, terrestre ou aerotransportado, consiste actualmente numa das tecnologias mais utilizadas para a aquisição de enormes volumes de dados num curto período de tempo. No entanto, os dados LiDAR são, acima de tudo, dados geométricos, discretos e irregulares, pelo que inúmeras operações necessitam ser efectuadas sobre estes dados, para que, a partir deles, se possa extrair a mais variada informação acerca do objecto submetido ao varrimento. A extracção de linhas de quebra definidoras de estruturas rodoviárias que permitem a geração de modelos digitais de terreno (MDT) mais robustos nestas zonas é um tema algo trabalhado pela comunidade científica, no entanto, muitos dos trabalhos baseiam-se em abordagens matriciais, convertendo os dados laser em matrizes de cotas e trabalhando sobre elas de uma forma mais eficiente. Sabe-se, contudo, que a incapacidade de adaptação destas malhas regulares à diferente complexidade do terreno, leva à perda de informação, qualidade e precisão. Na metodologia desenvolvida dá-se, então, preferência a operações sobre representações vectoriais, procurando trabalhar sobre os dados originais e utilizar algoritmos e estruturas de dados específicos para resolver problemas geométricos diversos. É, no entanto, de referir que todos esses algoritmos foram já desenvolvidos por estudos de geometria computacional, consistindo este trabalho numa conjugação de muitos deles segundo uma sequência lógica, de modo a se produzir algo novo, neste caso, a extracção automática de pontos definidores de perfis transversais rodoviários para criação de *breaklines* rodoviárias.

O processo desenvolvido é semi-automático pois é auxiliado por informação cedida pelo utilizador através da marcação de pontos *seed* sobre uma imagem intensidade definindo a direcção da estrada a vectorizar e pela indicação do número de vias em cada lado da linha marcada. Assim, a metodologia é iniciada com o cálculo dos rumos entre os pontos *seed* marcados, a divisão da nuvem de pontos tridimensionais em troços limitados pelos pontos *seed*, a criação de uma TIN por cada troço, e a definição de perfis planimétricos transversais à estrada dentro de cada troço. Posteriormente, cada um dos pontos planimétricos de cada perfil é procurado na TIN do respectivo troço, de modo a se identificar o triângulo em que este está contido para que se determine a sua cota por projecção no plano do triângulo. Em cada perfil tridimensional criado são procurados os pontos definidores de linha guia, limite da plataforma e ponto inferior da valeta. Na procura da guia é utilizada a característica intensidade de cada ponto, para a identificação do limite da plataforma é analisada a cota de cada ponto em relação aos vizinhos do interior para o exterior da faixa de rodagem e para a identificação do ponto de valeta é usada a regressão polinomial. Para a validação dos pontos identificados automaticamente é calculada a distância de *Hausdorff* destes pontos às linhas correspondentes adquiridas previamente por vectorização manual em ambiente CAD, directamente sobre a nuvem de pontos LiDAR.

Palavras-chave: geometria computacional, *breaklines*, MDT, perfis transversais rodoviários.

Abstract

Terrestrial or airborne LiDAR system is currently one of the most used technologies for acquiring large volumes of data in a short period of time. However, LiDAR data are above all geometric, discrete and irregular data, so many operations on these data have to be performed before one can extract any information about the scanned object. The extraction of road breaklines that allow the generation of more robust digital terrestrial models (DTM) in these areas, it is a subject already worked by the scientific community. Nevertheless, many of the research studies rely on matrix approaches, converting the laser data into a gridded elevation model that allows better efficient performance. It is known that the adaptation inability of these regular meshes to different complexities of the terrain leads to a loss of information, quality and accuracy.

In the developed methodology is made an effort to work with the original data and it is given preference to vector operations choosing algorithms and specific data structures to solve several geometric problems. It should be noted that all this algorithms have already been developed through studies of computational geometry, consisting this work in a combination of many of them according to a logical sequence in order to produce something new, in this case, the automatic extraction of road cross section breakpoints, so that road breaklines can be created.

The developed process is semi-automatic once it is aided by information provided by the user by marking seed points on an intensity image setting the direction of the road and indicating the number of lanes on each side of the marked line. Therefore, the methodology starts with the computation of the direction between the marked seed points and then the three-dimensional laser point cloud is divided in sections defined by the seed points. After that each section is triangulated and 2D road cross sections are created. Subsequently, each of the planimetric points of each road cross section is searched in the respective TIN in order to identify the triangle that contains the point and determine the point elevation through its projection in the triangle plan. In each 3D profile, points defining the guideline, the limit of the platform and the bottom point of the ditch are searched. The first element is searched through the intensity of each laser point; the boundary of the road platform is identified examining the elevation of each profile point relative to its neighbors from the interior to the exterior of the roadway; and the ditch point is detected using polynomial regression.

The validation of the points automatically identified is done calculating the Hausdorff distance between them and the corresponding lines previously acquired by manual vectorization in CAD environment directly on the LiDAR point cloud.

Key-words: computational geometry, breaklines, DTM, road cross sections.

Índice

Índice de Figuras	VII
Índice de Tabelas	X
Lista de Abreviaturas	XI
1. Introdução	1
1.1 Apresentação do Problema	1
1.2 Objectivo	2
1.3 Estado de arte	2
1.4 Organização do trabalho	5
2. Fundamentação teórica	6
2.1 Princípio básico do LiDAR	6
2.2 Modelação da superfície	8
2.2.1 Geração de grelhas regulares	12
2.2.2 Geração de grelhas triangulares	13
2.2.2.1 Triangulação de Delaunay	15
2.3 Algoritmo de <i>Douglas-Peucker</i>	17
3. Metodologia	19
3.1 Descrição da área de estudo	19
3.2 Descrição dos dados	20
3.3 <i>Workflow</i> do algoritmo	25
3.4 Determinação da direcção da estrada	27
3.5 Armazenamento da TIN	32
3.6 Acesso à TIN	36
3.7 Ponto contido em triângulo	39
3.8 Cálculo da equação do plano do triângulo	42
3.8.1 Vector normal	43

3.9	Definição dos perfis transversais	44
3.10	Redução da dimensão amostral de um perfil	47
3.11	Detecção de pontos definidores	48
3.11.1	Identificação do Limite de plataforma	50
3.11.2	Análise longitudinal do Limite de plataforma.....	52
3.11.3	Identificação da Valeta	55
3.11.4	Análise longitudinal da Valeta.....	58
3.11.5	Identificação de guias	58
4.	Resultados e Discussão.....	60
5.	Conclusões e Trabalhos futuros	71
6.	Referências.....	73
7.	Anexos	75

Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Componentes básicos de um sistema LiDAR, neste caso aerotransportado, e sistemas de coordenadas e sua relação para a georreferenciação directa dos pontos objecto.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2 - Exemplo de grelha regular rectangular (à esquerda) e de grelha irregular triangulada (à direita).</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3 - Exemplo de malha regular (A) e de malha triangular (B).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4 - Solução da construção da TIN pelo método de varrimento linear (à esquerda) e pela triangulação de Delaunay (à direita) para o mesmo conjunto de pontos.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5 - Processo de criação de uma TIN pelo método de Triangulação de Delaunay.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6 - Triangulação de Delaunay sobreposta ao Diagrama de Voronoi a tracejado.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7 - Linha original, 29 vértices (a), Douglas-Peucker, primeiro passo: selecção do vértice 15 (b) e Douglas-Peucker, segundo passo: selecção do vértice 9 (c).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8 - Douglas-Peucker, terceiro passo: selecção do vértice 3 (a); Douglas-Peucker, quarto passo: eliminação do vértice 2 (b); Douglas-Peucker final após execução do mesmo processo para todos os restantes segmentos.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9 - Enquadramento do troço do IC3 usado como área de estudo.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10 - Três perfis transversais encontrados ao longo do troço escolhido para a área de estudo.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11 - Exemplo de um Sistema Laser Móvel Terrestre.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 12 - Nuvem de pontos laser tridimensional representada pelas quatro fiadas independentes já ajustadas relativamente (vista em perspectiva).</i>	<i>22</i>
<i>Figura 13 - Nuvem de pontos laser tridimensional representada pela intensidade de cada ponto através de valores de cinzento (vista em perspectiva).</i>	<i>22</i>
<i>Figura 14 - Diferença entre MDT (a vermelho) e MDS (a azul).</i>	<i>23</i>
<i>Figura 15 - Em cima: Vista de topo dos dados laser classificados pelo software comercial (rosa: terreno; verde claro: vegetação baixa; verde escuro: vegetação alta). Em baixo: Perfil transversal correspondente à região demarcada pelo rectângulo da imagem de cima.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 16 - Diagrama da metodologia.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 17 - Relação entre o sistema de coordenadas imagem (preto a cheio) e o sistema de coordenadas terreno (azul a tracejado).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 18 - Imagem de intensidades obtida a partir dos pontos laser.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 19 - Pormenor ampliado (quadrado branco da Fig. 12). Cada pixel mede 0.08 m em x e em y.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 20 - Inserção dos pontos seed efectuada pelo utilizador que permitirá dividir o lote, neste caso, em 8 troços de menor dimensão.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 21 - À esquerda: representação do rumo de cada ponto seed para o seguinte; à direita: representação esquemática do cálculo do rumo.</i>	<i>30</i>

<i>Figura 22 - Representação esquemática dos quatro casos possíveis da determinação do rumo através do cálculo auxiliar do ângulo ϑ.</i>	31
<i>Figura 23 - A estrutura da TIN. Modelo topológico (à esquerda) e dados armazenados em tabelas de coordenadas dos pontos (tabela Pontos), tabela de triângulos definidos por pontos (tabela Nós dos triângulos) e tabela de triângulos e respectivos triângulos adjacentes (tabela Triângulos Vizinhos).</i>	32
<i>Figura 24 - Exemplo do ficheiro de coordenadas e valor de intensidade de cada ponto da nuvem laser.</i>	33
<i>Figura 25 - Exemplo dos ficheiros resultantes da triangulação de Delaunay (à esquerda) e da relação de vizinhança entre triângulos (à direita).</i>	33
<i>Figura 26 - Esquema representativo da relação dos pontos comuns entre triângulos vizinhos de um determinado triângulo.</i>	34
<i>Figura 27 - Representação alternativa para o armazenamento da estrutura TIN.</i>	35
<i>Figura 28 - Representação da estrutura da rede TIN alternativa e ilustração dos apontadores necessários ao armazenamento dos dados para posterior acesso directo.</i>	35
<i>Figura 29 - Representação esquemática do método Jump-and-walk.</i>	37
<i>Figura 30 - Sinais das coordenadas baricêntricas.</i>	40
<i>Figura 31 - Esquema explicativo da técnica baricêntrica do teste do ponto no triângulo.</i>	40
<i>Figura 32 - Esquema de um triângulo definido em R3.</i>	43
<i>Figura 33 - Definição dos perfis transversais à estrada, apenas representando o primeiro perfil de cada troço.</i>	
<i>Pontos rosa cheios: pontos seed marcados pelo utilizador.</i>	45
<i>Figura 34 - Resultado da operação de perfilamento de um troço de estrada. Como exemplo, estão representados isoladamente o quarto e último perfis do troço.</i>	46
<i>Figura 35 - Em cima: perfil transversal obtido com um intervalo de amostragem de 0.01 m, constituído por 5000 pontos, cada um representado por um valor de cinzento associado ao respectivo valor de intensidade determinado. Em baixo: pormenor aumentado da imagem de cima, no qual é possível visualizar cada ponto isoladamente.</i>	46
<i>Figura 36 - Em cima: a verde um perfil original de 5000 pontos. Em baixo: a lilás o perfil simplificado de 1808 pontos.</i>	48
<i>Figura 37 - Perfis sobrepostos às linhas obtidas manualmente.</i>	48
<i>Figura 38 - Pormenores aumentados da área compreendida pelos rectângulos a cinzento da figura anterior ilustrando os limites esquerdo e direito da estrada.</i>	49
<i>Figura 39 - Exemplo esquemático da rotação dos perfis.</i>	50
<i>Figura 40 - À esquerda: identificação do limite da plataforma a partir dos pontos do perfil simplificado. À direita: pormenor aumentado do ponto seleccionado sobreposto ao perfil.</i>	51
<i>Figura 41 - Pontos detectados como definidores de limite esquerdo da plataforma (a amarelo).</i>	52
<i>Figura 42 – Variabilidade na identificação dos pontos definidores de perfil para o elemento limite de plataforma (pontos a amarelo).</i>	52
<i>Figura 42 - Representação esquemática de uma regressão linear.</i>	53
<i>Figura 44 - À esquerda: ajuste linear altimétrico dos pontos identificados. À direita: ajuste linear planimétrico dos pontos identificados.</i>	54

<i>Figura 45 – Em cima: pormenor aumentado da Figura 43. Em baixo: exemplo ilustrativo do resultado da análise longitudinal para o limite de plataforma da qual só se mantiveram os pontos a vermelho.</i>	55
<i>Figura 46 - Identificação do ponto de valeta (a verde) a partir do mínimo da curva ajustada ao perfil (a vermelho) calculada por regressão polinomial.</i>	56
<i>Figura 47 - Pormenor aumentado da figura anterior mostrando o mínimo da curva ajustada (a vermelho) e o ponto do perfil mais próximo deste (a verde).</i>	57
<i>Figura 48 - Detecção do ponto definidor de valeta.</i>	57
<i>Figura 49 – Eliminação dos pontos a amarelo através da análise longitudinal dos pontos identificados como definidores de valeta.</i>	58
<i>Figura 50 - Estratégia de detecção dos pontos definidores de guias. Pontos a amarelo: limite da plataforma. ..</i>	59
<i>Figura 51 – Perfis simplificados sobrepostos às linhas vectorizadas manualmente sobre o laser.</i>	60
<i>Figura 52 - As propriedades da distância de Hausdorff.</i>	61
<i>Figura 53 - Ilustração da sensibilidade da distância de Hausdorff relativamente às extremidades das linhas em análise.</i>	61
<i>Figura 54 - A linha obtida manualmente (pontos a verde) segmentada segundo os limites da linha obtida automaticamente (pontos a vermelho).</i>	62
<i>Figura 55 - Distância de ponto à recta.</i>	63
<i>Figura 56 - Determinação da proximidade entre duas linhas.</i>	64
<i>Figura 57 - Valeta direita do troço 1.</i>	66
<i>Figura 58 - Valeta esquerda do troço 2.</i>	66
<i>Figura 59 - Limite de plataforma direito do troço 2.</i>	67
<i>Figura 60 - Limite de plataforma direito do troço 3.</i>	67
<i>Figura 61 - Limite de plataforma direito do troço 4.</i>	67
<i>Figura 62 - Limite de plataforma direito do troço 5.</i>	67
<i>Figura 63 - Valeta esquerda do troço 6.</i>	68
<i>Figura 64 - Sobreposição dos pontos detectados como definidores de guias (a amarelo) à linha obtida por vectorização manual (a vermelho).</i>	68
<i>Figura 65 - Valeta esquerda do troço 1.</i>	69
<i>Figura 66 - Valeta esquerda do troço 5.</i>	69
<i>Figura 67 - Limite de plataforma esquerdo do troço 8.</i>	69
<i>Figura 68 - Ilustração das linhas resultantes da ligação dos pontos obtidos automaticamente (a verde: guias; a vermelho: limite de plataforma; e amarelo: valeta) e dos perfis extraídos pela metodologia. Alternados entre ciano e cinza estão dispostos os 8 troços teste criados.</i>	70
<i>Figura 69 - Pormenor aumentado da figura anterior descriminando a guia, limite de plataforma e valeta esquerdos.</i>	70
<i>Figura 70 - Perspectiva direita de todo o lote trabalhado.</i>	70
<i>Figura 71 - Em cima: perfil transversal em recta. Em baixo: perfil transversal em curva.</i>	76

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Quadro comparativo entre os modelos de grelha regular e irregular triangulada.</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2 - Cálculo do rumo consoante a direcção do troço.</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 3 - Ângulos de rotação do perfil consoante o rumo da estrada.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 4 - Resultados da avaliação da proximidade dos elementos rodoviários obtidos.</i>	<i>65</i>

Lista de Abreviaturas

MDT	Modelo Digital de Terreno
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDE	Modelo Digital de Elevação
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanner</i>
MTLS	<i>Mobile Terrestrial Laser Scanner</i>
ALS	<i>Airborne Laser Scanner</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

1. Introdução

1.1 Apresentação do Problema

O laser scanner móvel terrestre, MTLS (*Mobile Terrestrial Laser Scanner*), ou aerotransportado, ALS (*Airborne Laser Scanner*), também conhecido como LiDAR (*Light Detection and Ranging*), tem vindo a ser utilizado há já várias décadas numa variedade de estudos e aplicações relativas à representação de superfícies (Pacheco, et al., 2011), tornando-se numa tecnologia viável à aquisição automática de Modelos Digitais de Terreno (MDT). Ao longo da última década, tem-se verificado um aumento da investigação sobre a utilização de dados adquiridos por este tipo de sensores para realizar a complexa tarefa de extracção automática de elementos como sejam edifícios, estradas, etc.

As linhas de quebra, tecnicamente designadas por *breaklines*, são elementos vectoriais que contêm informação morfológica importantíssima para um MDT, uma vez que representam zonas onde existem mudanças bruscas na direcção da inclinação da superfície. As *breaklines* ajudam, então, a descrever as discontinuidades da superfície e são fundamentais na geração de modelos digitais de terreno mais robustos. São estes vectores tridimensionais que representam máximos locais de curvatura da superfície e definem, neste caso, as vias e elementos complementares, que se pretendem obter semi-automaticamente neste trabalho de tese.

Habitualmente, estas linhas de quebra são adquiridas fotogrametricamente por estereorrestituição ou vectorizadas directamente sobre o laser por um operador especializado, constituindo ambas tarefas bastante minuciosas, demoradas e, por isso, dispendiosas. Aqui se prende o propósito deste trabalho, facilitar esta tarefa de aquisição de nova informação morfológica, em formato vectorial, a partir apenas de uma nuvem tridimensional de pontos e da radiometria de cada um deles, isto é, do valor de intensidade de cada ponto registado pelo sensor.

A extracção de estradas a partir de dados LiDAR é um tópico de investigação bastante estudado pelo que na última década foram já realizadas várias tentativas para extrair estradas a partir de dados laser, essencialmente de dados provenientes de ALS. A extracção de linhas directamente a partir de nuvens de pontos LiDAR é uma tarefa que é dificultada pelo facto de os pontos laser se encontrarem aleatoriamente distribuídos sobre a superfície fazendo com que, dependendo da densidade de pontos, os elementos a restituir sejam delineados com maior ou menor perfeição.

1.2 Objectivo

O objectivo deste trabalho de tese centra-se no desenvolvimento de um algoritmo que permita a extracção semi-automática dos elementos constituintes de uma estrada como limites de pavimento, guias, valetas e taludes, sob a forma de elementos vectoriais tridimensionais, a partir de nuvens de pontos laser de elevada densidade (50 ponto/m²) e precisões de 1-2 cm, por forma a constituírem *breaklines* permitindo a geração de modelos de terreno mais correctos.

Este trabalho parte de um conjunto de pontos adquiridos por um sistema laser móvel terrestre previamente processados, ajustados e classificados pelo que os métodos de morfologia matemática e computação gráfica descritos neste relatório são utilizados apenas com o intuito de análise geométrica da superfície definida por estes pontos.

Dizem-se pontos previamente processados pois as suas coordenadas foram determinadas por processamento em software próprio após a sua aquisição por varrimento laser; e previamente ajustados e classificados pois o respectivo ajustamento (relativo e absoluto) e classificação foram efectuados no software comercial *TerraScan*, não estando estes processos contemplados na metodologia desenvolvida e apresentada neste trabalho.

Outro objectivo consiste na validação dos resultados obtidos pela metodologia desenvolvida através da sua comparação com elementos vectoriais adquiridos por vectorização manual realizada directamente sobre os pontos laser previamente classificados como terreno.

1.3 Estado de arte

No que diz respeito à extracção de estradas a partir de dados LiDAR, várias metodologias foram estudadas na última década e alguns trabalhos desenvolvidos neste sentido. No entanto, como já foi referido, uma vez que a maioria destes trabalhos utiliza dados proveniente de ALS, e portanto, com uma densidade bastante reduzida na ordem de 1 ponto/m², grande parte dos estudos foca a sua implementação em técnicas de processamento e segmentação de imagem (Rieger, et al., 1999; Clode, et al., 2004). Como tal, a maioria das metodologias trabalha sobre modelos de terreno representados por malhas regulares geradas a partir de nuvens de pontos irregularmente distribuídos, e através de algoritmos de processamento digital de imagem são realizadas operações de vizinhança muito mais rapidamente.

Neste caso, a perda de precisão aquando da criação do modelo regular por interpolação não constitui um problema na medida em que a densidade dos pontos já é bastante baixa à partida. Consequentemente, em todos estes trabalhos apenas se pretende diferenciar as estradas de todos os restantes objectos presentes sobre a superfície terrestre, representando-as por elementos vectoriais associados ao eixo rodoviário de cada segmento detectado, extraíndo-se redes viárias.

Em Rieger, et al. (1999) os pontos laser originais são interpolados num MDT através de uma grelha com pontos de 20 em 20 cm, e um modelo digital de declive calculado pela primeira derivada é criado a partir desse MDT, isto é, cada ponto da nova grelha é dado pelo ângulo de elevação da superfície nesse ponto. Posteriormente esse modelo é convertido numa imagem *raster*, sendo os valores de inclinação registados por valores de cinzento, onde os *pixels* mais brilhantes representam declives mais acentuados. Classificando os *pixels* como “*pixel plano*” ou “*pixel inclinado*”, através da análise dos 8 *pixels* vizinhos de cada *pixel plano*, se pelo menos um *pixel inclinado* está presente, o *pixel* central é classificado como “*pixel de quebra*”. As *breaklines* são, então, detectadas como fronteiras entre as áreas planas e as áreas inclinadas mostrando-se, no entanto, bastante fragmentadas.

Clode, et al. (2004) desenvolve um novo método de detecção automática de estradas a partir também de dados laser de baixa densidade, o qual já introduz a característica intensidade de cada ponto como nova informação a ser trabalhada. Apoiando-se também em modelos digitais regulares, baseia-se na atribuição de valores de tolerância relativamente à proximidade da superfície da estrada ao MDT, relativamente ao valor de intensidade característico do material que a compõe e ainda em relação à proximidade entre pontos vizinhos, para eliminar ou deixar de considerar *pixels* que não estejam dentro dos valores estipulados. Assim gerada uma imagem binária identificando os *pixels* candidatos a constituírem a rede viária, são-lhe aplicados uma série de operadores morfológicos para extracção da rede final.

Em Akel, et al. (2005) converte-se a nuvem de pontos LiDAR numa TIN através da triangulação de *Delaunay* e para cada triângulo da TIN é calculada a direcção do vector normal ao plano do triângulo e a altitude média dos três vértices que constituem cada triângulo. Posteriormente, um algoritmo de segmentação de crescimento de regiões com um determinado valor de *threshold* é utilizado de modo a unir triângulos de igual direcção da normal e valor de cota. A posterior separação entre zonas de estrada e não-estrada é feita comparando a área das várias regiões com a área da maior casa presente na imagem. Para além dos trabalhos descritos acima, outros podem ser encontrados relativos a esta temática.

Nos vários métodos resumidamente relatados, a posterior conversão do formato *raster* para o formato vectorial inclui uma série de operações de suavização a fim de eliminar os efeitos em zigzag causados pela estrutura quadriculada do *raster*, e para além disso, a elevação destas linhas de quebra ou rede viária é extraída a partir do respectivo MDT interpolado previamente.

Apesar de constituírem métodos de extracção apenas da linha representativa do eixo da estrada são métodos muito utilizados na extracção de redes viárias para aplicações SIG e cartografia de pequena escala. No entanto, para cartografia de grande escala ou para projectos de construção ou reabilitação de vias, a extracção apenas do eixo central é insuficiente e a informação tridimensional dos vários elementos rodoviários, como sejam as bermas ou limites de pavimento, as valetas ou até taludes, torna-se necessária.

O uso de dados LiDAR de grande densidade (50 pontos/m²), através de sistemas laser helitransportados ou terrestres (móvel ou não), permite que a variação altimétrica entre o pavimento da estrada e a valeta, por exemplo, seja detectada, abrindo novos objectivos à detecção automática de *breaklines* rodoviárias. De modo a incorporar estas linhas de quebra rodoviárias nos modelos digitais de terreno para que estes sejam correctamente criados nestas zonas ou para que se possam fazer estudos acerca do estado das estradas, é necessário vectorizar-se manualmente todas as suas componentes (guia, limite de plataforma, valeta e talude) pois não existe incorporado em nenhum *software* um algoritmo de identificação e vectorização automática da morfologia de uma estrada a partir de nuvens de pontos. No entanto, alguns estudos foram já desenvolvidos no sentido de restituir automaticamente uma estrutura rodoviária, obtendo-se os elementos vectoriais tridimensionais que a definem longitudinalmente.

Briese (2004) propôs um método de modelação de *breaklines* tridimensionais sendo a sua posição determinada através da intersecção de dois planos ajustados aos pontos laser, cada plano localizado num dos lados de uma *breakline* dada como aproximação inicial. A intersecção desses dois planos resulta numa nova aproximação à *breakline* que volta a dividir os dados laser em duas regiões às quais serão novamente ajustados dois planos que cuja intersecção resulta numa nova aproximação à *breakline*. O processo é iterado até se atingir uma *breakline* estável. Após terminado o processo de aproximação, é ajustada uma função *spline* aos pontos tridimensionais para a representação da *breakline* final. A grande desvantagem desta metodologia consiste na necessidade de vectorização bastante aproximada de cada *breakline* que se pretende extrair.

Yunjae Choung (2009) utiliza dados laser com uma precisão horizontal de 0.80 m e baseia-se na extracção de arestas importantes dos triângulos de um modelo digital de terreno triangulado a partir da nuvem de pontos, associando a cada aresta o ângulo que os vectores normais dos triângulos que lhe são adjacentes fazem entre si. Assim, quanto menor for esse ângulo menos importante é a aresta. Posteriormente, as arestas seleccionadas são submetidas a uma série de análises para eliminação das falsas *breaklines* tendo em conta vários critérios nomeadamente o declive da aresta, a altitude dos seus vértices, a sua proximidade e ligação a outras arestas importantes, etc. Posteriormente, as lacunas existentes entre os segmentos determinados são corrigidas em ArcMap, uma das componentes do *software* comercial ArcGIS. A automatização deste método fica, então, comprometida quando necessita de um trabalho manual posterior para ligação dos vários segmentos detectados.

Martins (2010) propõe uma metodologia semi-automática para a extracção do eixo rodoviário a partir de pares estereoscópios de fotografias aéreas de baixa resolução e do respectivo modelo digital de terreno gerado a partir dos dados laser. A metodologia consiste num processo iterativo iniciado com pontos *seed* fornecidos pelo operador no espaço-imagem, que após transformação para o espaço-objecto passam por ciclos de optimização até descreverem o eixo da estrutura rodoviária. Outros trabalhos, baseando-se em metodologias mais complexas, podem ser encontrados em Belton, et al. (2009) que faz uso da análise de componentes principais (PCA) da nuvem de pontos para a detecção de linhas a partir de dados TLS.

1.4 Organização do trabalho

Este documento pretende descrever todo o trabalho de tese desenvolvido e está organizado separando o fundamento teórico mais exaustivo da metodologia criada.

Assim, no primeiro capítulo é feito o levantamento do problema e apresentado o objectivo que se pretende alcançar e, de modo a enquadrar o problema, é exposta uma sucinta descrição do seu estado de arte.

No capítulo 2 é apresentada alguma fundamentação teórica de conceitos e algoritmos mais gerais utilizados no trabalho justificando sempre a razão de ser da sua escolha.

O capítulo 3 é o mais longo e diz respeito à metodologia adoptada. Nele é descrita a área de estudo, são apresentados os dados utilizados no projecto e exposto o *workflow* da metodologia proposta, sendo cada uma das suas etapas posteriormente discriminada e fundamentada com a devida teoria.

No capítulo 4 são apresentados alguns resultados e é realizada a sua discussão através do método de análise escolhido cuja teoria subjacente é também descrita sucintamente neste ponto.

Por fim, no capítulo 5, são tecidas algumas conclusões acerca do trabalho realizado e propostos novos objectivos para trabalhos futuros que surjam no seguimento deste.

2. Fundamentação teórica

2.1 Princípio básico do LiDAR

O sistema LiDAR pode ser considerado como uma das técnicas mais inovadoras para a obtenção de coordenadas de pontos na superfície terrestre e para a geração de um Modelo Digital de Superfície (MDS). O LiDAR é uma ferramenta capaz de adquirir grandes volumes de dados de grande resolução a uma maior velocidade, quando comparada com outras tecnologias.

Este sistema combina numa plataforma, aerotransportada ou móvel terrestre, o Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*), que regista a posição da aeronave ou veículo em intervalos de tempo fixos enquanto outro receptor de base (no terreno) possibilita a correcção diferencial do posicionamento do sensor determinando as suas coordenadas X, Y e Z em pós-processamento; o Sistema de Navegação Inercial (INS – *Inertial Navigation System*) formado por uma unidade de três acelerómetros e três giroscópios (IMU – *Inertial Measurement Unit*) que permitem determinar a atitude da plataforma através da medição da sua aceleração e velocidade angular em torno dos eixos X, Y e Z; e o equipamento laser que armazena o tempo de emissão e recepção de cada pulso, que permitirá calcular a distância do sensor até o alvo situado no terreno, bem como a resposta espectral de cada objecto varrido (Habib, et al., 2008).

O laser é um sensor activo que possui a capacidade de obter uma grande quantidade de dados do terreno, não sofrendo interferência pela falta de iluminação nem de distorções como acontece nas fotografias aéreas (Sanhueza, 2007). À medida que a plataforma transportadora se vai deslocando, o dispositivo emissor vai oscilando e emitindo pulsos laser para a superfície terrestre. Em cada ponto da superfície, o feixe é reflectido e captado pelo mesmo dispositivo, pelo que da multiplicação do intervalo de tempo entre a emissão e a recepção do feixe pela velocidade da luz, resulta a dupla distância entre o emissor e o ponto à superfície de reflexão (Yunjae Choung, 2009).

Os varrimentos são geralmente efectuados perpendicularmente à direcção do movimento da plataforma que o transporta. Para além disso, um único pulso tem a capacidade de reflectir múltiplos alvos que se encontrem na sua linha de visão podendo o sensor laser receber múltiplas reflexões ou retornos de um mesmo pulso, situação mais comumente verificada em áreas arborizadas. Este recurso permite que se consigam medições directas do solo mesmo em regiões mais cobertas por

vegetação. Sistemas comerciais conseguem actualmente medir até cinco ecos por pulso mas na prática não é comum receber-se mais do que três retornos (Morin, 2002).

O sistema LIDAR integra, então, três tecnologias para determinar a posição dos pontos sobre a superfície terrestre. O relacionamento matemático entre as três componentes posicionais para a determinação de um ponto i qualquer no terreno (Figura 1), a partir dos dados medidos, pode ser efectuado através das observações realizadas por estas componentes relacionadas segundo a equação (1) ou (2) (Habib, et al., 2008). Neste cálculo envolvem-se quatro vectores posicionais: o vector posição entre a antena GPS no terreno e na plataforma móvel, o vector entre a antena GPS da plataforma e o INS, o vector entre o INS e o sensor laser, e entre o sensor laser e o ponto i no terreno.

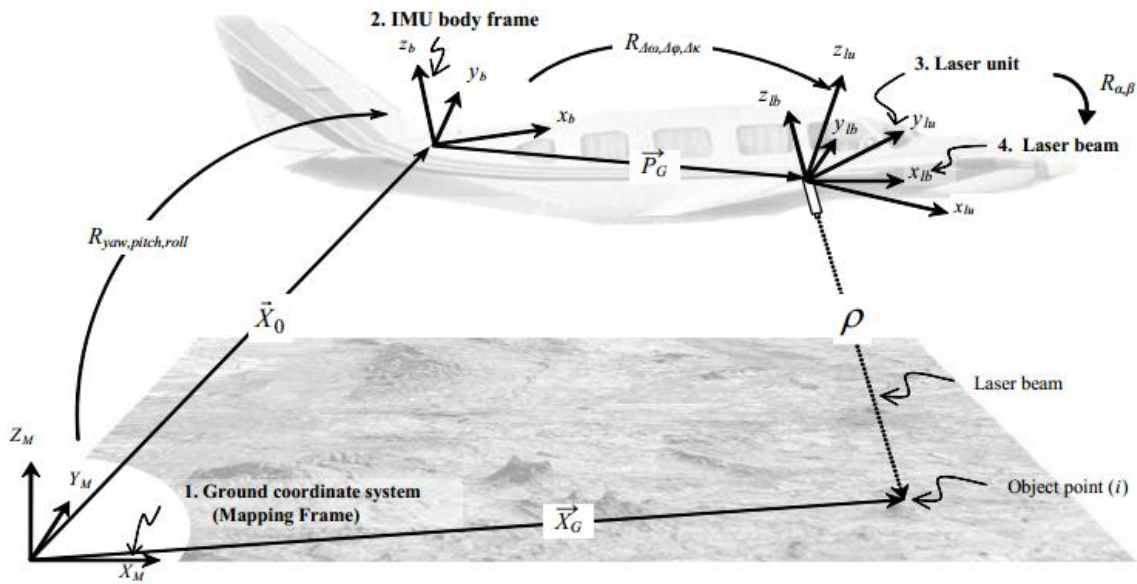


Figura 1 – Componentes básicos de um sistema LiDAR, neste caso aerotransportado, e sistemas de coordenadas e sua relação para a georreferenciação directa dos pontos objecto.

$$\vec{X}_G = \vec{X}_0 + R_{yaw,pitch,roll} \vec{P}_G + R_{yaw,pitch,roll} R_{\Delta\omega,\Delta\phi,\Delta\kappa} R_{\alpha,\beta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + R_{INS}^m R_{LASER}^{INS} \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} + R_p^{LASER} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde:

- X_p, Y_p, Z_p : coordenadas do ponto “p” no referencial geodésico;
- x_o, y_o, z_o : coordenadas do sistema GPS/INS no referencial geodésico;
- x_L, y_L, z_L : coordenadas do sensor LiDAR a partir do sistema GPS/INS;
- R_{INS}^m : matriz de rotação do sensor INS em relação ao referencial geodésico;
- R_{LiDAR}^{INS} : matriz de rotação do sensor LiDAR em relação ao sistema GPS/INS;
- R_p^{LiDAR} : matriz de rotação entre o pulso LiDAR em relação ao sensor LiDAR;
- ρ : distância entre o ponto “p” e o sensor LiDAR.

O modelo assume que o sensor inercial é coincidente com o GPS, ou seja, que se utiliza um sistema integrado GPS/IMU, obtido pela integração destes sistemas, não existindo rotação e/ou translação entre eles. Esta integração deve possuir uma correcta materialização e determinação na montagem dos sistemas, pois, caso contrário, podem causar erros sistemáticos não modelados. A equação (1) assume o sistema calibrado e isento de erros sistemáticos. A Figura 1 ilustra a relação dos sistemas de coordenadas envolvidos num sistema LiDAR móvel, no entanto, apesar de na figura estar apresentada uma aeronave, este trabalho baseou-se em dados laser provenientes de LiDAR móvel terrestre, que apesar de diferir na estrutura de varrimento, pois as configurações do projecto são diferentes, a relação entre os sistemas de coordenadas mantém-se.

2.2 Modelação da superfície

Um MDT, também designado por MDE (Modelo Digital de Elevação), consiste em qualquer conjunto de dados em suporte numérico que, para uma dada zona, permite associar a qualquer ponto definido sobre o plano cartográfico um valor correspondente à altitude (Matos, 2008). Representa o comportamento da superfície terrestre numa dada região, sendo obtido através de dados que representam directamente o terreno, contrariamente ao Modelo Digital de Superfície (MDS) que contém não só informações da morfologia do terreno como também de objectos existentes sobre este, como sejam edificações, vegetação, etc.

O MDT consiste num produto de uma enorme aplicabilidade no que respeita a análises geográficas de fenómenos espaciais, tendo fundamental importância em aplicações de geoprocessamento. Para além disso, sobre estes podem ser efectuadas as mais variadas operações como seja o cálculo de volumes, análise de perfis e de secções transversais, geração de imagens em níveis de cinzento, geração de

mapas de declives, de exposição, de visibilidade, de drenagem, de curvas de nível, etc., cruciais nas tarefas de planeamento, ordenamento, elaboração e implantação de projectos.

A criação de um MDT parte essencialmente de dois tipos de dados obtidos das mais variadas maneiras: pontos e linhas. O ponto cotado é a forma mais simples de representação do relevo estando, este, associado a coordenadas tridimensionais, sejam elas geocêntricas/ geodésicas rectangulares (X,Y,Z), geográficas/geodésicas elipsóidais (ϕ, λ, h) ou simplesmente rectangulares/cartográficas (M,P,H), que o permitem ser localizado geograficamente. Os pontos cotados podem ser obtidos a partir de diversos métodos, sejam eles levantamentos topográficos, fotogramétricos, digitalização vectorial de cartografia, etc. A partir de linhas, nomeadamente, curvas de nível, também é possível gerar um MDT. Estas linhas que unem pontos de igual altitude podem ser obtidas por estereorestituição, por vectorização de cartografia ou eventualmente por interpolação a partir dos pontos cotados.

Os modelos digitais de terreno podem ser representados por equações analíticas ou por redes de pontos de modo a transmitirem as características espaciais do terreno. O processo de geração de um modelo de terreno envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste com o objectivo de se obter uma representação contínua a partir das amostras de dados (Câmara, et al., 2007).

Considera-se que existem cinco modelos espaciais diferentes, os quais assentam em suposições distintas acerca da forma como essa realidade pode ser representada e, por sua vez, na forma como cada um deles pode ser manipulado matematicamente: modelos em quadrícula, modelos de triângulos, modelos de isolinhas, modelos pontuais regulares e modelos pontuais irregulares.

Estas estruturas são definidas de forma a possibilitar uma manipulação conveniente e eficiente dos dados sendo as mais utilizadas a grelha regular ou a malha triangular. Assim, um modelo digital de terreno poderá ser uma expressão matemática aplicando R^2 em R^3 , um conjunto de pontos ou de linhas com uma regra de interpolação associada ou, como é mais correntemente utilizado, como uma superfície composta por faces num espaço tridimensional ou células dispostas regularmente (Matos, 2008).

O processo de construção de modelos digitais de terreno mais comum é baseado na triangulação de um conjunto de pontos com distribuição irregular, sendo a superfície assim modelada por um conjunto de faces triangulares. A altitude de qualquer ponto abrangido pelo modelo é definida pela altitude do ponto na face triangular em que se insere, o que corresponde a uma interpolação bilinear dentro de cada triângulo. A superfície assim gerada, designada por rede irregular triangulada (RIT, ou TIN de *Triangulated Irregular Network*), é por si só um MDT mas também um suporte habitual para a construção de modelos com outro tipo de estrutura, como é o caso dos modelos matriciais. Conforme o método adoptado para a construção da TIN, o desenho de triângulos adjacentes unindo todos os pontos de um conjunto será diferente.

Os modelos matriciais de pontos ou malhas regulares de pontos, tratam-se de modelos digitais com uma estrutura matricial que aproximam superfícies através de poliedros de faces rectangulares, ou seja, esta estrutura armazena uma amostra de pontos com uma origem comum e uma distância de amostragem constante nas direcções x e y . Assim, cada ponto da malha, indicado por linha e coluna da matriz, possui um valor de elevação z (Martins, 2010). Os vértices desses poliedros são normalmente pontos interpolados a partir de uma malha irregular de pontos cotados, e conforme o espaçamento da grelha, ou seja, a resolução em x ou y , maior ou menor será o nível de informação constante no modelo sobre a superfície analisada.

À excepção dos modelos matriciais, todos os modelos referidos anteriormente são representados em formato vectorial, ou seja, os fenómenos geográficos são descritos utilizando pontos, linhas ou polígonos. Na estrutura de dados vectorial a unidade lógica ou primitiva gráfica corresponde a uma linha ou segmento de recta, sendo estas armazenadas como séries de pares de coordenadas contínuas, ou seja, devidamente localizadas no espaço através de um sistema geográfico de coordenadas de referência. Os pontos são considerados linhas de comprimento zero, ou seja, apenas uma localização correspondente a uma par de coordenadas X, Y . As linhas ou arcos possuem, no mínimo, dois pares de coordenadas X, Y correspondentes aos pontos terminais do segmento de recta. As áreas são definidas, no mínimo, por três pares de coordenadas X, Y sendo o primeiro e o último par coincidentes, de forma a fechar o polígono. Deste modo, a estrutura vectorial é fundamentalmente orientada para os objectos.

Associadas aos modelos matriciais podem referir-se as estruturas de dados *raster*, também conhecidas por *grids* ou ainda matrizes de cotas, as quais são igualmente formadas, por um conjunto de linhas e colunas regularmente espaçadas cuja menor unidade espacial, ou unidade lógica básica, constitui uma célula ou *pixel* (abreviatura de *Picture element*), a qual é a única primitiva gráfica presente. O tamanho desta unidade de imagem depende da resolução definida previamente, ou seja, quanto maior for a resolução da imagem menor será a dimensão da célula. Assim, um ponto de coordenadas (x,y) é definido na maior parte dos casos como o centro da célula, sendo-lhe associado um valor de cota, no caso de um MDT, ou um outro valor representativo de um qualquer fenómeno que se pretenda modelar.

Para a resolução final de um modelo de dados regular deverá existir um compromisso entre a precisão dos dados e o tempo de geração da grelha e a sua dimensão (Câmara, et al., 2007). A partir de um conjunto de pontos irregulares, uma vez definida a resolução pretendida e consequentemente amostradas as coordenadas planimétricas de cada ponto da grelha regular, pode-se aplicar qualquer método de interpolação para calcular o valor aproximado de elevação para um ponto de cada um dos pontos da grelha.

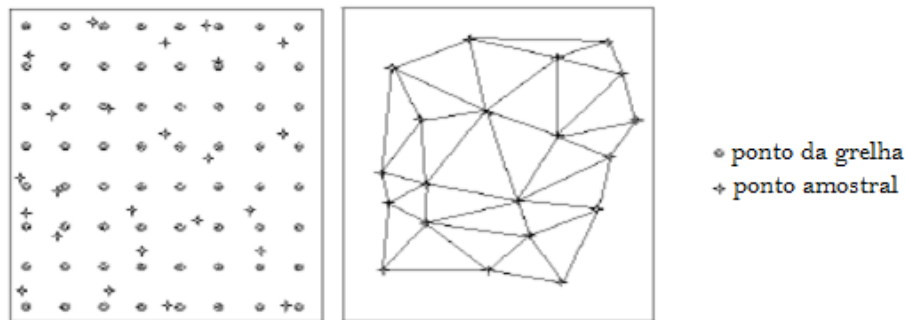


Figura 2 – Exemplo de grelha regular rectangular (à esquerda) e de grelha irregular triangulada (à direita).

Contrariamente aos vértices da malha rectangular, os vértices da rede triangular correspondem aos pontos amostrados da superfície, característica que permite que as informações morfológicas importantes, como é o caso das discontinuidades representadas por *features* lineares de relevo não sejam perdidas. Deste forma, a amostragem irregularmente espaçada é mais eficiente na representação de superfícies com grande variação do relevo do que a amostragem regularmente espaçada (Martins, 2010). No entanto, os procedimentos para a obtenção de informação derivada de redes triangulares tendem a ser mais complexos e consequentemente mais demorados que os aplicados às estruturas de grelhas regulares que, devido à sua simplicidade, tornam-se mais adequadas às operações de análise espacial apresentando, no entanto, alguns inconvenientes nomeadamente, uma grande redundância de informação nas zonas em que o terreno é uniforme, a incapacidade de adaptação à diferente complexidade do terreno sem que se altere a dimensão das células, a perda de informação importante aquando da sua geração, etc. (Matos, 2008). Apesar da complexidade dos procedimentos e dos requisitos de espaço de armazenamento, as redes irregulares trianguladas são utilizadas quando se deseja modelar a superfície de maneira mais precisa.

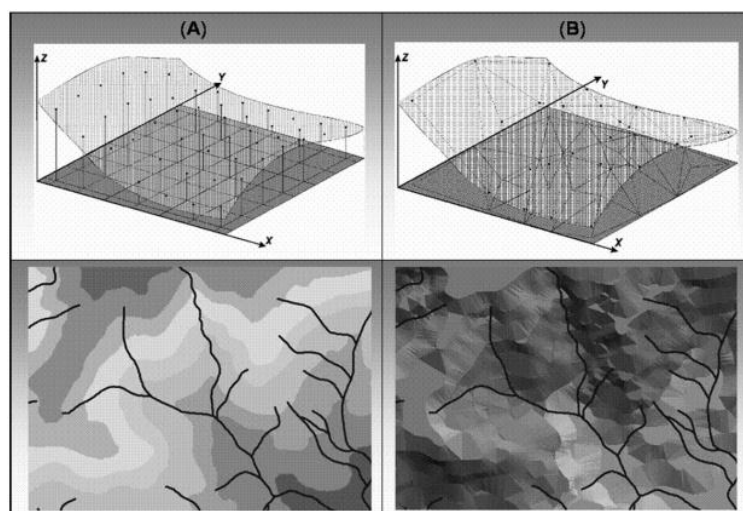


Figura 3 – Exemplo de malha regular (A) e de malha triangular (B).

A construção de uma representação digital do relevo do terreno de acordo com a estrutura de dados TIN corresponde sempre a uma estrutura de representação vectorial ao passo que os modelos regulares ou matriciais, apesar de poderem ser armazenados em formato vectorial (matriz de pontos) ou formato *raster* (matriz de células), são quase sempre representados no segundo formato, pois como já sofreram o processo de interpolação para serem gerados é preferível trabalhá-los neste modo pelas vantagens descritas na Tabela 1. Na seguinte tabela estão declaradas algumas das vantagens e desvantagens referidas anteriormente sobre os modelos de dados regulares e dados irregulares triangulados, que respectivamente são identificados na tabela por GRID e TIN.

Tabela 1 – Quadro comparativo entre os modelos de grelha regular e irregular triangulada.

<i>GRID</i>	<i>TIN</i>
Apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo	Não apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo
Os vértices dos rectângulos são estimados a partir das amostras	Os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto amostral
Apresenta problemas para representar superfícies com variações locais acentuadas	Representa melhor superfícies não homogéneas com variações locais acentuadas
Estrutura de dados mais simples	Estrutura de dados mais complexa
Relações topológicas explícitas entre os rectângulos	É necessário identificar e armazenar as relações topológicas entre os triângulos
Mais utilizado em aplicações qualitativas e análises multiníveis no formato <i>raster</i>	Mais utilizado em aplicações quantitativas
A precisão posicional depende da resolução adoptada	A precisão posicional só é limitada pela qualidade posicional do levantamento

2.2.1 Geração de grelhas regulares

A geração de malhas regulares dever ser efectuada quando os dados da amostra não são obtidos com um espaçamento regular. Assim, a partir da informação contida em curvas de nível ou nos pontos amostrados com espaçamento irregular, deve ser gerada uma grelha regular que represente da maneira mais fiel possível a superfície a modelar. Os valores iniciais a serem determinados são os espaçamentos nas duas direcções (x e y), resolução que tem de ser escolhida com algum cuidado para que se possam representar os valores de variação do relevo do terreno o mais coerentemente possível, sem que haja o risco de grande perda de informação importante. Um MDT quadriculado sofre com o problema de que as elevações são amostradas numa grelha regular o que pode simplificar o terreno em áreas acidentadas e sobreamostrá-lo em zonas mais lisas (Axelsson, 2000).

Assim, o processo de geração de uma grelha regular consiste em estimar os valores de cota de cada ponto da grelha a partir do conjunto de pontos da amostra de entrada. É importante referir que apesar da estimativa da cota de cada ponto da grelha regular ser realizada a partir de amostras vizinhas, a análise global das amostras é sempre necessária para se encontrar essa vizinhança (Matos, 2008).

Vários são os métodos de criação de grelhas regulares passíveis de se implementados a partir de uma amostra de pontos distribuídos irregularmente, nomeadamente o Inverso do Quadrado da Distância, *Kriging*, Mínima curvatura, Vizinho Natural, Vizinho mais próximo, Média móvel, etc. As diferenças entre os vários métodos consistem nos algoritmos matemáticos utilizados para calcular os pesos a serem atribuídos aos nós da grelha durante o processo de interpolação, pelo que de cada método resulta uma representação diferente dos dados. É, deste modo, importante que se teste cada método a um certo conjunto de dados para determinar qual o mais adequado ao conjunto de dados a analisar.

2.2.2 Geração de grelhas triangulares

As redes irregulares de triângulos utilizam os próprios pontos de amostra para modelar a superfície, não sendo necessário utilizar procedimento de estimação de valores (interpolação) como no caso da geração de grelhas regulares. Ao utilizar os próprios pontos de amostra elimina-se um factor de diminuição da confiabilidade do modelo pois a qualidade do modelo não é influenciada por um factor determinado pelo utilizador, como é o caso da selecção da resolução da *grid* na geração de modelos regulares. Os procedimentos de geração do modelo de superfície a partir das amostras e de manipulação da estrutura de armazenamento são muito mais complexos num modelo TIN, assim como os procedimentos para obtenção de dados derivados a partir dela. Esta complexidade leva a problemas de espaço de armazenamento e de tempo de processamento (Câmara, et al., 2007).

Numa TIN os pontos da amostra estão conectados formando uma triangulação. Esta triangulação pode ser definida como o grafo planar construído sobre N pontos (os vértices dos triângulos) de um espaço tridimensional XYZ , projectados no espaço bidimensional XY e unidos por segmentos de recta (as arestas dos triângulos) que não se interceptam. De seguida descrevem-se dois tipos de triangulação, a triangulação por varrimento radial e a triangulação de *Delaunay*.

O algoritmo de varrimento radial parte de um conjunto de pontos irregularmente distribuídos e determina o ponto mais próximo do centróide do conjunto de pontos (ponto focal). Posteriormente, calcula o azimuth do ponto focal para todos os restantes pontos da amostra, ordenando os pontos segundo o azimuth calculado. De seguida desenha, para todos os pontos, a linha que os une ao ponto focal e une-os aos pontos adjacentes segundo a ordenação por azimuthes. Fecham-se as concavidades da triangulação gerada e a partir deste passo inicia-se um processo iterativo. Ou seja, para cada par de

triângulos adjacentes, verifica-se se o comprimento do lado comum aos dois triângulos é superior à distância entre os vértices não comuns aos dois triângulos.

Em caso positivo, substitui-se a aresta comum pela que une os vértices não comuns (o que poderá não ser possível em certas situações). Iterativamente é efectuado este teste de comprimento de arestas até não ocorrerem mais substituições de arestas (Matos, 2008). O número de triangulações possíveis que podem ser geradas a partir de um determinado conjunto de pontos é muito grande, de modo que estabelecendo alguns critérios para a criação dos triângulos é possível reduzir o número de soluções viáveis.

A triangulação de *Delaunay* é a mais frequentemente utilizada na construção de modelos de terreno e corresponde ao conjunto de todos os segmentos de recta que unem pontos contíguos, formando um agrupamento de triângulos não excessivamente longos nem excessivamente afinados. Na construção dos triângulos, a triangulação de *Delaunay* garante que dentro da circunferência circunscrita que passa pelos três vértices do triângulo não existe nenhum outro ponto do conjunto de dados (regra do círculo circundante vazio). A triangulação de *Delaunay* maximiza o ângulo mínimo em cada par de triângulos, construindo triângulos o mais próximo possível da forma equilátera (Moura, 2006).

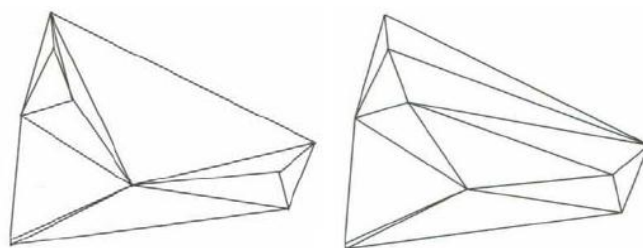


Figura 4 – Solução da construção da TIN pelo método de varrimento linear (à esquerda) e pela triangulação de *Delaunay* (à direita) para o mesmo conjunto de pontos.

O objectivo principal deste trabalho é desenvolver uma aplicação que extraia *features* vectoriais tridimensionais que definam a morfologia das estradas e elementos vizinhos exclusivamente a partir de dados laser com base na propriedade de variação altimétrica e intensidade. Através da análise da morfologia do terreno e do cálculo de gradientes altimétricos ao longo de perfis transversais à direcção da via pretende-se identificar pontos de quebra que definam zonas de maior variabilidade altimétrica de forma a se gerarem vectores que definam os elementos rodoviários pretendidos.

Devido a este facto e às razões acima referidas considerou-se o modelo TIN (Rede irregular de triângulos) como a estrutura de dados mais adequada para o desenvolvimento do trabalho pois, apesar de exigir um maior esforço computacional na sua análise, pretende-se que a extracção dos elementos representativos da via e, portanto, dos pontos de ruptura no relevo sejam identificados com alguma

precisão. Procurou-se, então, implementar uma metodologia que envolvesse este tipo de estrutura de dados pela sua maior proximidade com a superfície real.

2.2.2.1 *Triangulação de Delaunay*

A *triangulação de Delaunay*, introduzida, em 1934, pelo matemático russo *Boris Nikolaevich Delone*, depois chamado *Boris Delaunay*, é um grafo no qual, por definição, três pontos formam um triângulo de *Delaunay*, se e só se, o círculo que passa pelos três pontos não contém nenhum outro ponto da nuvem. Para a sua construção o método inicia-se escolhendo um dos pontos da rede, que em geral se deve situar num dos cantos da área de trabalho. Neste caso, opta-se pelo ponto situado no canto superior esquerdo da área de trabalho da Figura 5.

(Figura 5a) O processo inicia-se pelo traçado de duas circunferências com o mesmo raio, a colocar no Ponto Início (PI) e o ponto que lhe está mais próximo (distância Euclidiana). O raio das circunferências tem de ser superior a metade do comprimento do segmento que une os dois pontos referidos. Pelos pontos de intercepção das duas circunferências obtém-se o segmento que é perpendicular ao segmento que une os dois pontos e que passa pelo seu ponto médio.

(Figura 5b) O processo continua, agora do Ponto Início para o ponto seguinte que lhe está mais próximo do, procedendo-se da mesma forma. Obtém-se um novo segmento de recta, agora perpendicular ao segmento que une os dois novos pontos e que passa pelo seu ponto médio. O ponto de intercepção dos dois segmentos perpendiculares obtidos, corresponde ao centro da circunferência que irá passar pelos três pontos da RIT, também designado por circuncentro.

(Figura 5c) Após o traçado da circunferência que passa pelos 3 pontos, tem de garantir-se que não se inclui no seu interior mais nenhum ponto da rede. Se assim for, obtém-se o primeiro triângulo da TIN, determinado pelo método da triangulação de *Delaunay*. O processo continua e propaga-se para os restantes pontos da rede. Por fim, realiza-se o fecho das concavidades mais relevantes da TIN.

Sendo P um conjunto de n pontos não colineares no plano e k o número de pontos em P que se encontram sobre a fronteira do polígono convexo de P , da triangulação de *Delaunay* da nuvem de pontos P resultarão $2n-2-k$ triângulos e $3n-3-k$ arestas (Berg, et al., 2008).

O trabalho é realizado na plataforma MATLAB, uma linguagem de computação matemática desenvolvida e mantida pela MathWorks que incorpora múltiplas funções, facilitando a execução de uma série de operações nomeadamente a manipulação de matrizes, visualização de dados, cálculo matemático, etc. A geração dos triângulos de *Delaunay* utilizados neste trabalho é efectuada a partir de uma função disponível na biblioteca do MATLAB.

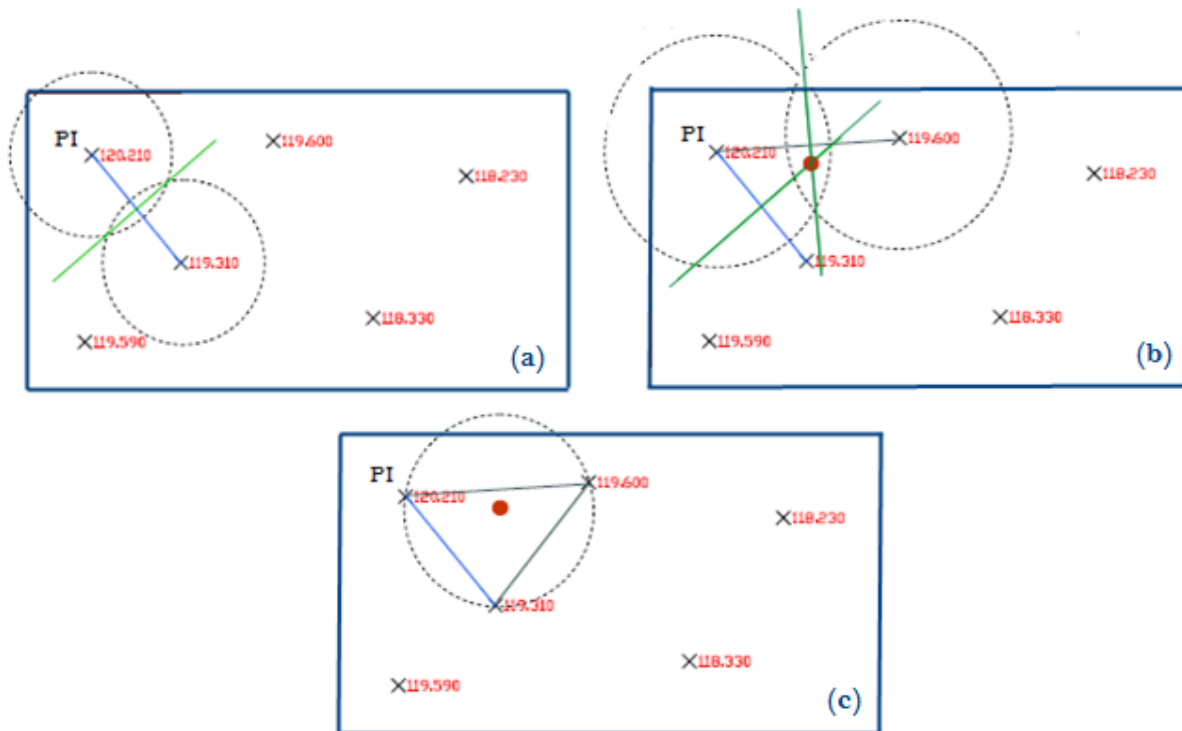


Figura 5 – Processo de criação de uma TIN pelo método de Triangulação de *Delaunay*.

Outra forma de definir a triangulação de *Delaunay* é através da criação prévia de polígonos de *Thiessen* ou, também designado, Diagrama de *Voronoi* ou ainda regiões de *Dirichlet*. Por cada ponto original da nuvem, também designados por pontos geradores, será formado um polígono de *Voronoi*, que garante que todos os pontos contidos nesta região estarão mais próximos do ponto gerador que lhe deu origem do que qualquer outro ponto gerador, pelo que o diagrama de *Voronoi* é um óptimo operador de proximidade no âmbito das operações de análise espacial. Logo, dois pontos estarão conectados na triangulação de *Delaunay* se os seus polígonos de *Thiessen* partilharem uma aresta, pelo que se depreende facilmente que o grafo dual do Diagrama de *Voronoi*, no caso do espaço euclidiano, corresponde à triangulação de *Delaunay* para o mesmo conjunto de pontos.

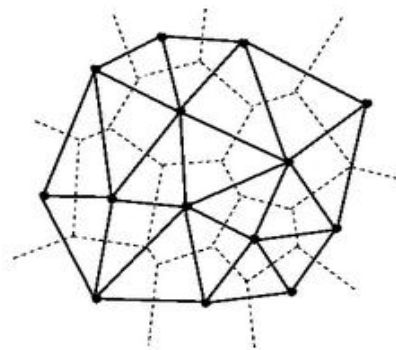


Figura 6 – Triangulação de *Delaunay* sobreposta ao Diagrama de *Voronoi* a tracejado.

2.3 Algoritmo de *Douglas-Peucker*

Quando se pretende aplicar algoritmos de geometria computacional a grandes quantidades de dados e, neste caso em particular, realizar análises a elementos definidos por uma grande densidade de pontos, o desempenho do processo ficará comprometido se esta quantidade for de facto muito elevada.

O algoritmo de *Douglas-Peucker* foi proposto em 1973 por *Douglas* e *Peucker* e é reconhecidamente o melhor método em termos de simplificação de elementos vectoriais e da preservação das características da poligonal original. A simplificação de *Douglas-Peucker* é um algoritmo recursivo que procura manter o ponto de maior distância perpendicular ao segmento de recta definido pelos pontos inicial e final da amostra. Sequencialmente, o ponto de maior distância perpendicular é usado para gerar dois novos segmentos de recta com os pontos inicial e final do elemento, que servirão como referência para escolha de dois novos pontos cuja distância perpendicular aos novos segmentos de recta, respectivamente, será a maior. A distância perpendicular entre os pontos e o segmento de recta é constantemente comparado com um valor de tolerância pré-definido que indica se o ponto testado é mantido ou eliminado.

Este algoritmo permite identificar pontos “não-característicos” permitindo eliminá-los. A divisão do elemento em segmentos de recta é repetida até que não haja nenhum ponto, dentro de cada segmento, fora da distância de tolerância fornecida ao algoritmo (Cordeiro, et al., 2002). Assim que terminado, é garantido que o elemento vectorial resultante apresente uma dimensão amostral inferior à do elemento gráfico original, mantendo, no entanto, a aparência inicial. Naturalmente, esta aparência será salvaguardada se o valor de tolerância escolhido não for demasiadamente grande quando comparado à distância que se consentirá eliminar, pois em processos de simplificação mais radicais, isto é, com tolerâncias maiores, o algoritmo pode ser levado a escolher vértices que acabam por deixar a linha com uma aparência pouco natural com tendência a apresentar “picos” entre vértices, ângulos muito agudos e mudanças bruscas de direcção.

É possível verificar-se processo de simplificação pelo método *Douglas-Peucker* que se desenvolve ao longo de um elemento vectorial de 29 vértices, demonstrado nas figuras 7 e 8 (Davis, et al., 2001).

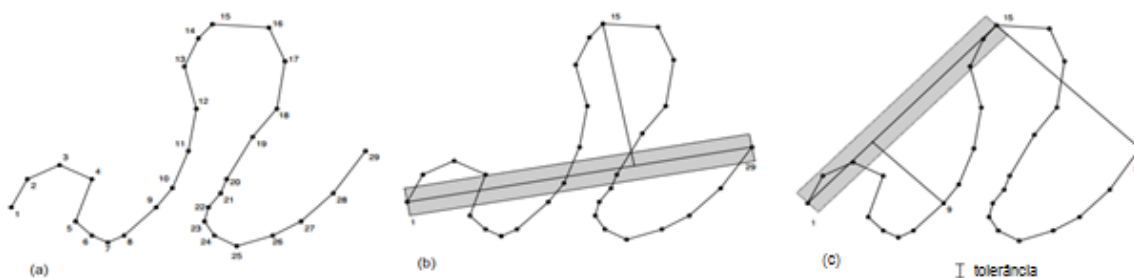


Figura 7 – Linha original, 29 vértices (a), *Douglas-Peucker*, primeiro passo: selecção do vértice 15 (b) e *Douglas-Peucker*, segundo passo: selecção do vértice 9 (c).

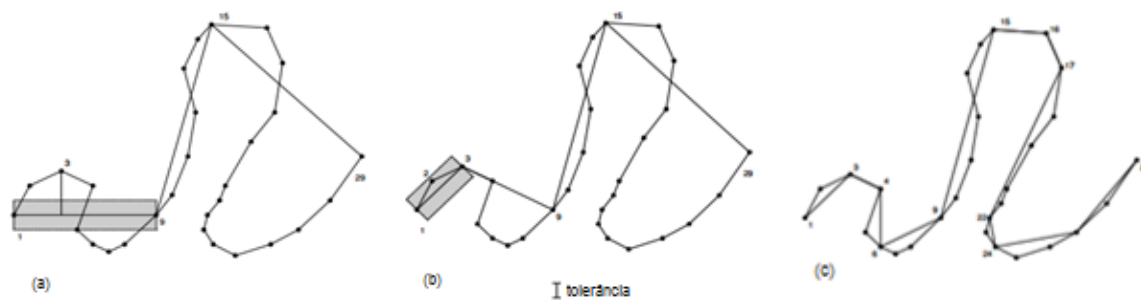


Figura 8 – *Douglas-Peucker*, terceiro passo: selecção do vértice 3 (a); *Douglas-Peucker*, quarto passo: eliminação do vértice 2 (b); *Douglas-Peucker* final após execução do mesmo processo para todos os restantes segmentos.

3. Metodologia

3.1 Descrição da área de estudo

Para a elaboração deste trabalho, foram utilizados dados provenientes de um levantamento a laser do Itinerário Complementar de Portugal nº3 (IC3) mais propriamente do lanço Tomar/Coimbra, através de um sistema LiDAR acoplado a uma carrinha.

O projecto de varrimento desta estrutura rodoviária desenrolou-se ao longo de dezenas de quilómetros, no entanto, para o desenvolvimento deste trabalho seleccionou-se apenas um pequeno troço de 200 metros de comprimento ao longo do qual a estrada toma diferentes morfologias, proporcionando a máxima versatilidade perfis de modo a garantir que a metodologia a ser desenvolvida funcione para diferentes cenários associados a um IC. A área de estudo abrange a região representada na Figura 9.



Figura 9 – Enquadramento do troço do IC3 usado como área de estudo.

A metodologia desenvolvida para a aquisição dos vectores definidores da estrutura tridimensional da estrada entra em linha de conta com aspectos técnicos e valores de referência relativos à construção de vias de comunicação, pelo que há diferenças quanto ao tipo de estrutura rodoviária com que se lida. O trabalho desenvolvido aplica-se apenas ao tipo de estrada IC, no entanto, vários modelos de perfis transversais podem ser verificados ao longo do lote seleccionado como área de estudo (Figura 10), o que obriga a que a metodologia desenvolvida seja o mais genérica possível mesmo aplicável apenas ao tipo de estrada IC.

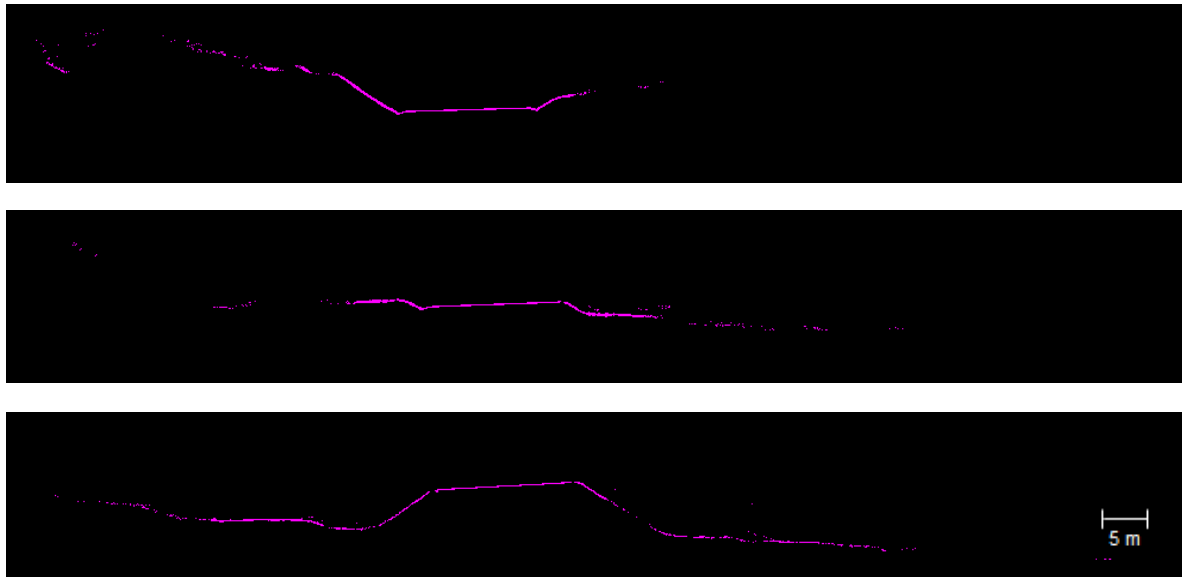


Figura 10 – Três perfis transversais encontrados ao longo do troço escolhido para a área de estudo.

3.2 Descrição dos dados

O princípio de operação do sistema de varrimento a laser baseia-se na determinação da distância entre o sensor e a superfície através de um pulso que se propaga à velocidade da luz, distância esta determinada medindo o tempo decorrido entre a emissão do pulso e o registo da fracção reflectida pela superfície (Wutke, et al., 2007).

Assim, com o sistema LiDAR montado no tejadilho do veículo transportador (Figura 11), o varrimento foi efectuado em duas passagens, uma em cada sentido da via varrendo cada um dos lados do veículo de modo a se garantir sobreposição de fiadas, obtendo-se no final destas passagens, quatro fiadas independentes com uma grande densidade de informação como se verifica pela Figura 12.



Figura 11 – Exemplo de um Sistema Laser Móvel Terrestre.

Estas quatro fiadas adquiridas do processo de varrimento foram pós-processadas em gabinete utilizando observações GPS de uma estação de base pertencente por exemplo a uma rede permanente, com o mesmo período de tempo de aquisição que o varrimento, de modo a se determinarem as coordenadas dos pontos do terreno medidos pelo sistema laser num sistema de coordenadas pré-definido para o projecto.

A nuvem de pontos foi gerada no sistema de coordenadas PT-TM06, apresentando uma densidade de 50 pontos por m^2 e uma precisão de 0.01 m.

Após a determinação das coordenadas de cada ponto pertencente a cada uma das quatro fiadas é necessário ajustá-las relativamente de modo a que as quatro possam formar uma nuvem laser única, apesar desta ainda não se encontrar georreferenciada de forma absoluta.

O ajustamento relativo necessário entre fiadas será mínimo se, aquando da campanha de varrimento, o sistema LiDAR (isto é, todos os componentes de posicionamento) estiver correctamente integrado e materializado e se, durante o pós-processamento de todos os dados provenientes do sistema, o ficheiro de calibração utilizado estiver correctamente criado. Ainda assim, é indispensável a realização deste ajustamento relativo que é feito com base nas zonas de sobreposição entre pares de fiadas.

Para o ajustamento absoluto da nuvem, são necessários pontos de controlo de coordenadas bem conhecidas previamente adquiridas em campo, equivalentes aos pontos fotogramétricos utilizados na fotogrametria. O mais frequente consiste na utilização de reflectores aquando do varrimento, de modo a que, através da característica intensidade, os pontos de controlo possam ser identificados na nuvem de pontos.

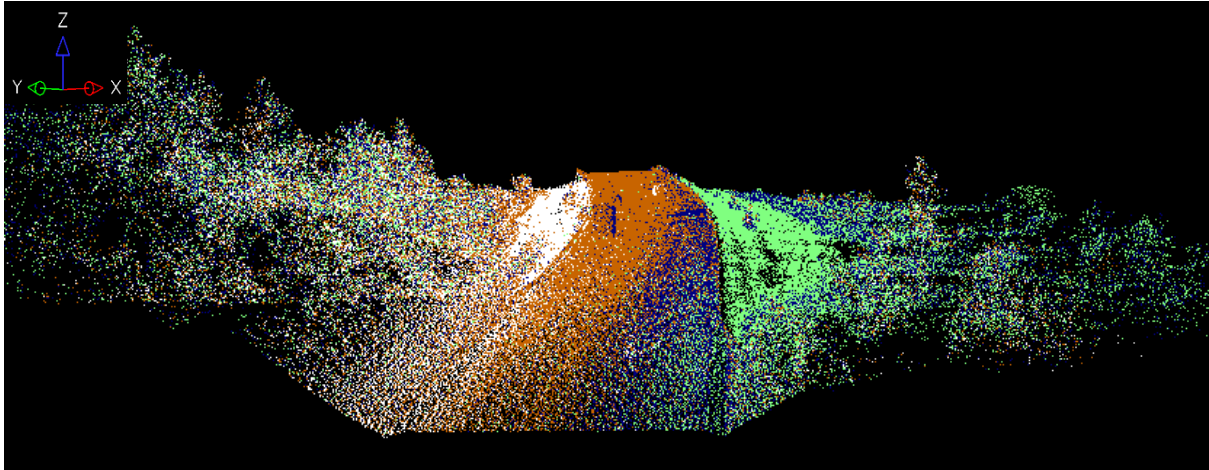


Figura 12 – Nuvem de pontos laser tridimensional representada pelas quatro fiadas independentes já ajustadas relativamente (vista em perspectiva).

O produto final de um sistema laser é, então, uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais (X_p, Y_p, Z_p) e valores de intensidade dos objectos reflectidos, como se mostra na Figura 13. No desenrolar do relatório, apesar das coordenadas dos pontos a trabalhar se tratarem de coordenadas cartesianas projectadas, M, P e Cota, serão referidas sempre como coordenadas x, y e z , bastando ter em mente que a coordenada x se refere ao eixo Este-Oeste definindo as meridianas e a coordenada y ao eixo Norte-Sul definindo as paralelas. A coordenada z dirá respeito à altitude ortométrica de cada ponto, e portanto, à cota de cada ponto.

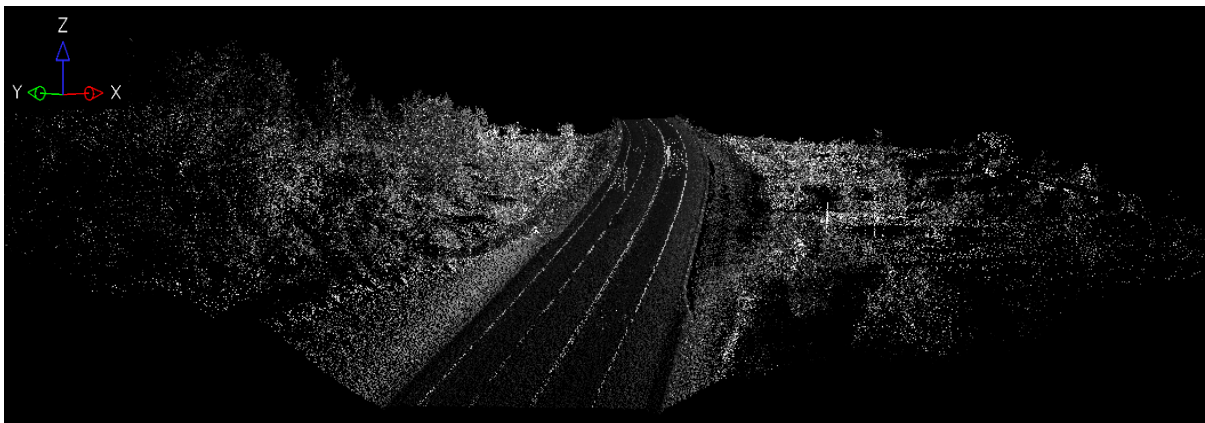


Figura 13 – Nuvem de pontos laser tridimensional representada pela intensidade de cada ponto através de valores de cinzento (vista em perspectiva).

O conceito de Modelo Digital de Superfície (MDS) distingue-se do conceito de MDT por se tratar de uma descrição do terreno que envolve a cota superior dos objectos acima da superfície, além do terreno, pelo que estes pontos adquiridos pelo sistema LiDAR permitem definir um MDS e não um MDT, Figura 14. A obtenção de um MDT a partir de dados LiDAR requer, numa primeira fase, a

identificação (classificação) dos pontos que correspondem a objectos acima do terreno de modo a excluí-los do MDS inicial, ou por outras palavras, o reconhecimento dos pontos que correspondem ao terreno para assim ser possível gerar um MDT.

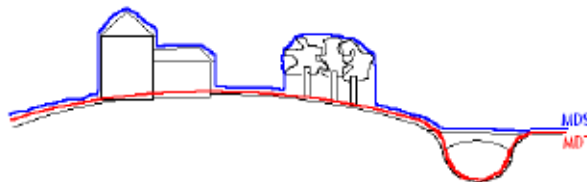


Figura 14 – Diferença entre MDT (a vermelho) e MDS (a azul).

As várias técnicas de obtenção de um MDT a partir da filtragem/classificação de um MDS dividem-se nos principais métodos (Pacheco, et al., 2011):

- Método da Declividade: a ideia principal deste filtro é a de que para uma dada diferença de altura entre dois pontos, a probabilidade de o ponto mais alto não pertencer ao terreno aumenta com a diminuição da distância linear entre eles;
- Método da Superfície: os mínimos locais da nuvem de pontos são considerados como pertencentes ao terreno e dão origem a uma superfície inicial. Um ponto qualquer pertence ao terreno se a diferença de altitude entre este ponto e a superfície inicial for menor que um limiar pré-estabelecido. O método é iterativo e a cada passo novos pontos são adicionados, melhorando a superfície inicial e aproximando-a do MDT.
- Método da Segmentação: o conjunto de dados é inicialmente segmentado e classificado por *clusters*. Os pontos de um segmento não pertencem ao terreno se a altura do segmento estiver acima da altura dos segmentos vizinhos. Este método inclui a aplicação de filtros morfológicos, nos quais os pontos LiDAR são classificados como pertencentes ou não pertencentes à superfície do terreno pela aplicação de operações de Dilatação e Erosão à grelha regular previamente criada.

Naturalmente, cada método de filtragem assume diferentes hipóteses a respeito da morfologia local do terreno, existindo métodos bastante robustos como é o caso do algoritmo existente no *software TerraScan*, da firma finlandesa *Terrasolid*, baseado no método da declividade e de grande consistência na sua performance (Axelsson, 2000). As seguintes figuras demonstram o resultado da classificação efectuada pelo respectivo algoritmo, sendo esta filtragem aceite como válida pois a metodologia desenvolvida neste trabalho assenta num MDT criado a partir dos pontos classificados como terreno pelo algoritmo deste programa (pontos a rosa nas imagens da Figura 15).

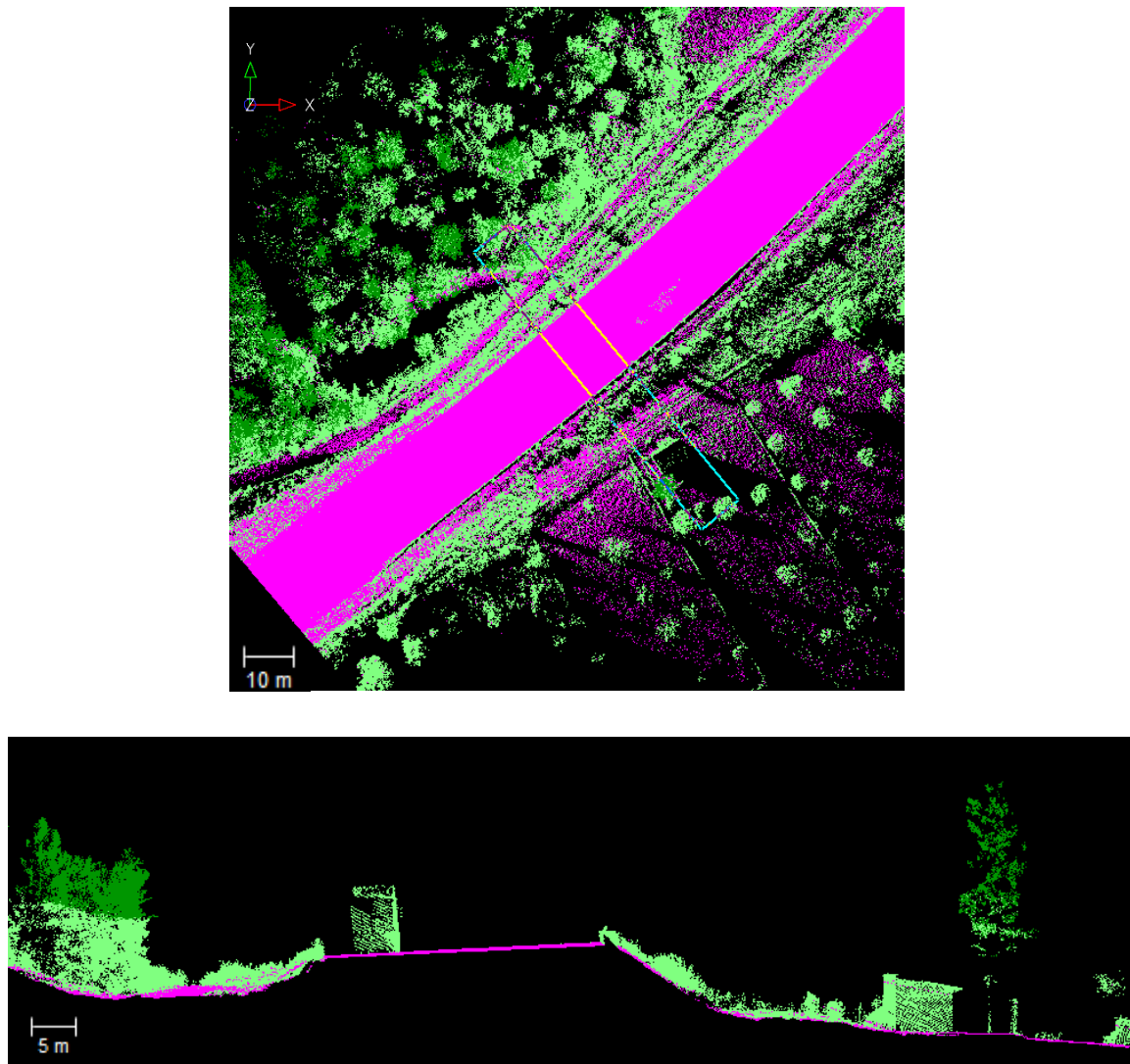


Figura 15 – Em cima: Vista de topo dos dados laser classificados pelo software comercial (rosa: terreno; verde claro: vegetação baixa; verde escuro: vegetação alta). Em baixo: Perfil transversal correspondente à região demarcada pelo rectângulo da imagem de cima.

Configurou-se esta classificação de modo a que todos os pontos fossem classificados dentro de apenas três categorias, nomeadamente terreno, baixa vegetação e alta vegetação, pelo que se pode verificar que tanto o edificado à direita da imagem de baixo da Figura 15 como o veículo pesado que se encontra sobre a estrada, foram classificados como vegetação baixa. Não existe qualquer problema quanto a este aspecto pois apenas os pontos a rosa, que definem o terreno, constituem os dados de partida para a elaboração deste trabalho.

3.3 Workflow do algoritmo

A metodologia adoptada para a concretização do objectivo proposto para o trabalho de tese está esquematizada na Figura 16. Cada uma das fases é abordada individualmente no decorrer no documento. O processo é iniciado com uma nuvem de pontos tridimensional correspondente apenas ao terreno, pois da nuvem total de pontos classificados foram seleccionados somente os referentes à classe *ground*. A partir daqui é efectuada uma série de operações de geometria computacional com a finalidade de extrair linhas que restituam a figura de uma estrada, ou seja, os elementos vectoriais que definem a sua morfologia. Começa-se por adquirir a orientação da estrada a partir de uma imagem intensidade e de dados fornecidos pelo utilizador através da marcação sobre a imagem de alguns pontos *seed* que definam segmentos de recta ao longo de uma linha guia, permitindo não só o cálculo da direcção dos vários segmentos, como também a divisão do lote de pontos laser em troços de menor dimensão. A partir das direcções dos troços calculadas segue-se a definição planimétrica dos perfis transversais à estrada em cada troço. Da nuvem de pontos laser de cada troço é originada uma TIN, na qual, todos os pontos ficam topologicamente referenciados, armazenando-se a informação da topologia de pontos e da vizinhança de triângulos. O processo de geração de modelos de terreno triangulados e a razão da sua escolha como modelo de terreno a ser utilizado neste trabalho estão descritos no ponto 2.2 do capítulo de fundamentação teórica. Posteriormente, a aquisição da altimetria de cada perfil é constituída por um conjunto de operações geométricas incluindo a aplicação da estratégia de acesso à TIN *Jump-and-Walk*, o teste de ponto contido em triângulo, o cálculo do vector normal de um triângulo no espaço e o cálculo da equação do plano do triângulo. Após a aquisição dos perfis transversais no espaço, cada perfil foi submetido ao processo de simplificação através do algoritmo *Douglas-Peucker*, de modo a que a busca de pontos definidores ao longo de um perfil transversal seja mais eficiente.

Para a determinação dos pontos definidores, cada perfil tridimensional foi sujeito a uma rotação no plano XY para que o perfil transversal à direcção da estrada possa ser visualizado e trabalhado em duas dimensões, com a direcção do perfil no eixo horizontal e a altimetria no eixo vertical, facilitando os processos geométricos seguintes. Na identificação do limite de plataforma recorreu-se à análise de cotas e diferenças de cotas ao longo do perfil beneficiando do facto da estrada ao nível da faixa de rodagem ser plana e para o elemento rodoviário valeta utilizou-se a regressão polinomial devido à morfologia desses elementos. A identificação das guias foi efectuada a partir da característica intensidade associada a cada ponto do perfil. Posteriormente, é feita uma análise longitudinal dos pontos resultantes recorrendo-se à regressão linear simples. Por fim, com o intuito de analisar e avaliar os resultados da aplicação da metodologia adoptada, é feita uma comparação de linhas através do

algoritmo *Distância de Hausdorff*, para que se tenha uma medida quantitativa da proximidade entre as linhas obtidas e as consideradas verdadeiras adquiridas por vectorização manual.

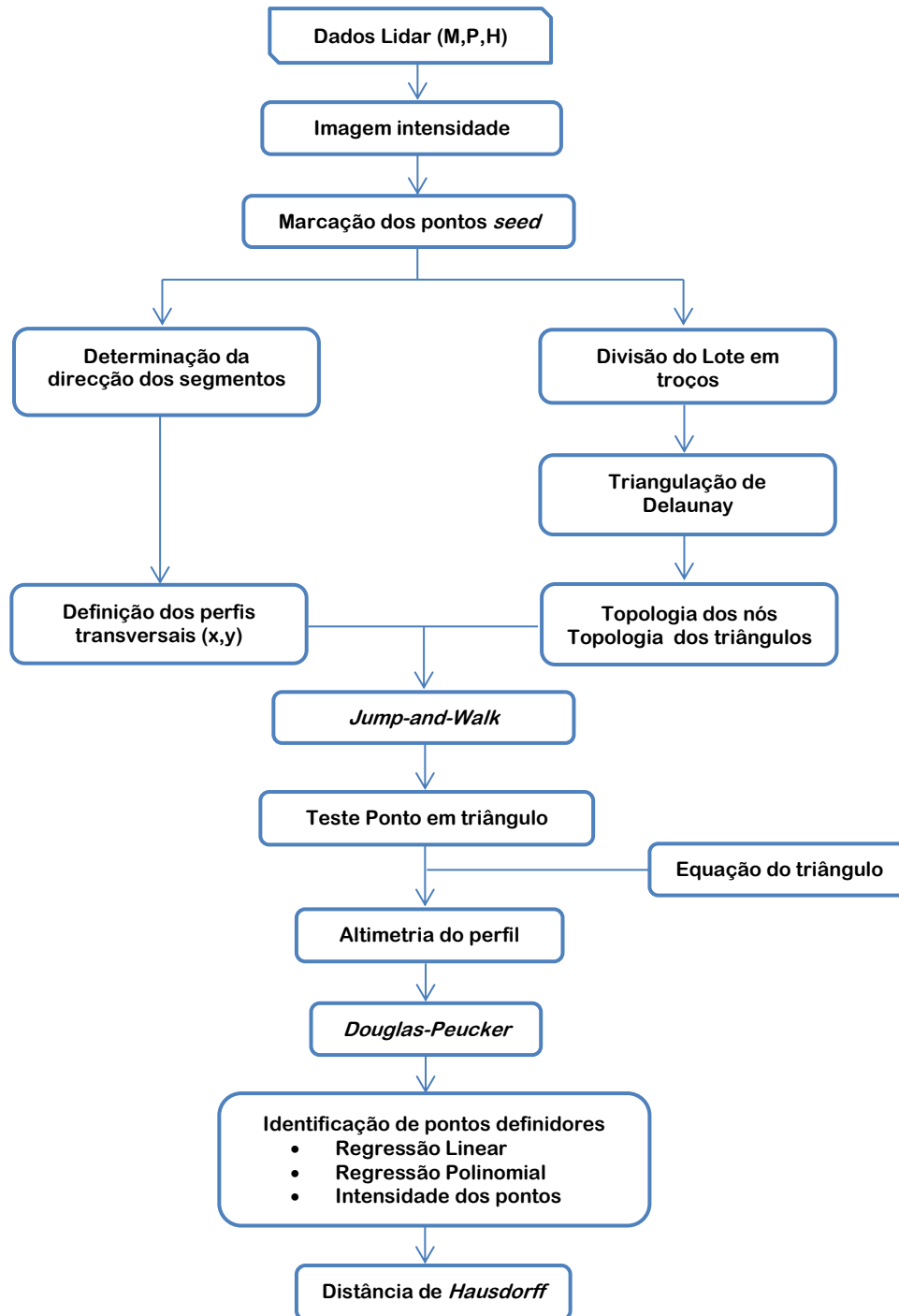


Figura 16 – Diagrama da metodologia.

3.4 Determinação da direcção da estrada

Para a determinação da direcção da estrada a restituir é exigida ao utilizador a marcação de alguns pontos *seed* ao longo de uma linha qualquer que defina a direcção da via, sendo uma linha guia uma boa escolha, pois estas são facilmente identificáveis numa imagem criada a partir da intensidade dos pontos laser devido ao seu elevado valor de reflectância e porque estas acompanham o comportamento da via em termos da sua orientação ao longo de todo o seu comprimento.

De modo a se criar uma imagem que demonstre o comportamento dos dados laser em termos de valores de intensidade, construiu-se uma imagem *raster* através de uma estratégia semelhante ao método de contagem por quadrantes seguindo os princípios do algoritmo proposto por (Wack, et al., 2002), gerando-se uma grelha regular sem passar pelo processo de triangulação. Para que tal aconteça, é necessário determinarem-se os valores de x e y mínimos e máximos, de modo a se conhecer a janela de coordenadas que se irá criar, e definir-se previamente um valor de resolução pretendido, isto é, a dimensão dos pixels resultantes. Deste modo, definiu-se uma resolução geométrica dos *pixels* de 0.08 m, sendo o número de linhas e de colunas da grelha determinados através das equações (3) e (4).

$$nlinhas = \frac{(y_{max} - y_{min})}{resolução} \quad (3)$$

$$ncolunas = \frac{(x_{max} - x_{min})}{resolução} \quad (4)$$

A configuração do sistema de coordenadas imagem é dado pela sua origem no canto superior esquerdo da grelha com o eixo dos xx a crescer no sentido das colunas e o eixo dos yy no sentido das linhas, como mostra a Figura 17. No entanto, as coordenadas terreno são definidas de modo a que o eixo dos yy cresça para Norte e o eixo dos xx para Este, pelo que é necessário uma conversão entre os dois referenciais.

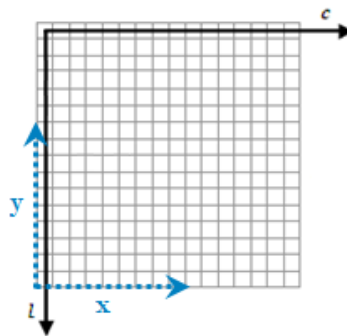


Figura 17 – Relação entre o sistema de coordenadas imagem (preto a cheio) e o sistema de coordenadas terreno (azul a tracejado).

Depois de determinada a dimensão da imagem resultante ($nlinhas \times ncolunas$), atribui-se a cada um dos *pixels* um valor de intensidade inicial de 0, dando origem a uma imagem totalmente negra. De seguida, cada ponto laser é projectado na grelha regular, ou seja, são determinadas as coordenadas imagem (linha, coluna) correspondentes a cada ponto (x , y ou E , N), que consiste simplesmente na identificação da célula em que este será armazenado. Assim, para cada ponto laser representado por i nas seguintes expressões, são calculados os índices de linha, equação (5), e coluna, equação (6), do *pixel* em que cada ponto será projectado, onde y_{max} corresponde à coordenada do extremo Norte e x_{min} diz respeito à coordenada Oeste mínima da área a representar.

$$linha = \frac{(y_{max} - y_i)}{resolução} \quad (5)$$

$$coluna = \frac{(x_i - x_{min})}{resolução} \quad (6)$$

É, então, identificado o *pixel* da grelha em que cada um dos pontos se enquadra, armazenando-se em cada *pixel* a média das intensidades dos pontos laser que nele calham. Os *pixels* que não contêm qualquer ponto mantêm-se com intensidade zero. Deste modo, resulta uma imagem intensidade, representada pela Figura 18, com 2488 x 3003 *pixels*, na qual é pedido ao utilizador que selecione alguns pontos *seed* que definam a direcção da estrada, ao longo de uma guia por exemplo, de modo a dividir a estrada, que é ligeiramente curva, em segmentos de recta. Tal operação é demonstrada na Figura 20. A Figura 19 representa o pormenor ampliado da Figura 18 (quadrado branco), podendo-se visualizar os *pixels* com os respectivos valores de intensidade, representados por valores de cinzento, calculados pelo processo descrito anteriormente.

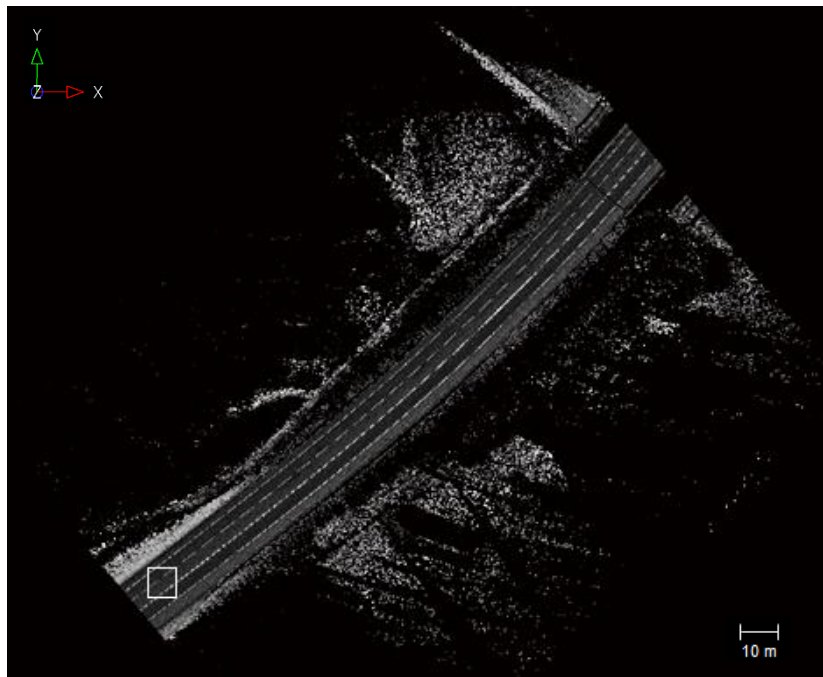


Figura 18 – Imagem de intensidades obtida a partir dos pontos laser.

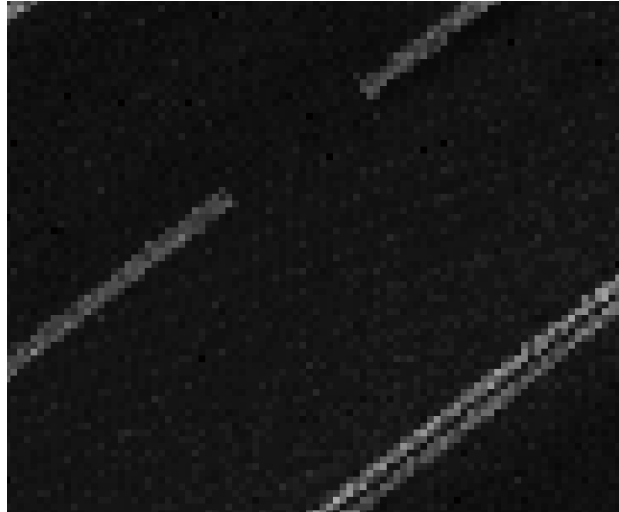


Figura 19 – Pormenor ampliado (quadrado branco da Fig. 12).
Cada *pixel* mede 0.08 m em x e em y.

Esta definição dos pontos *seed* permite dividir o lote de estrada em troços mais pequenos, processo que facilitará a posterior operação de triangulação da nuvem de pontos e a definição dos perfis transversais ao longo da estrutura rodoviária, uma vez que a direcção da estrada fica, então, definida pelo rumo de um ponto *seed* para o seguinte. A dimensão de cada ficheiro correspondente ao conjunto de pontos de cada troço terá, neste caso, cerca de 1/8 da dimensão do ficheiro inicial correspondente ao lote total, que contém cerca de 3 milhões de pontos.

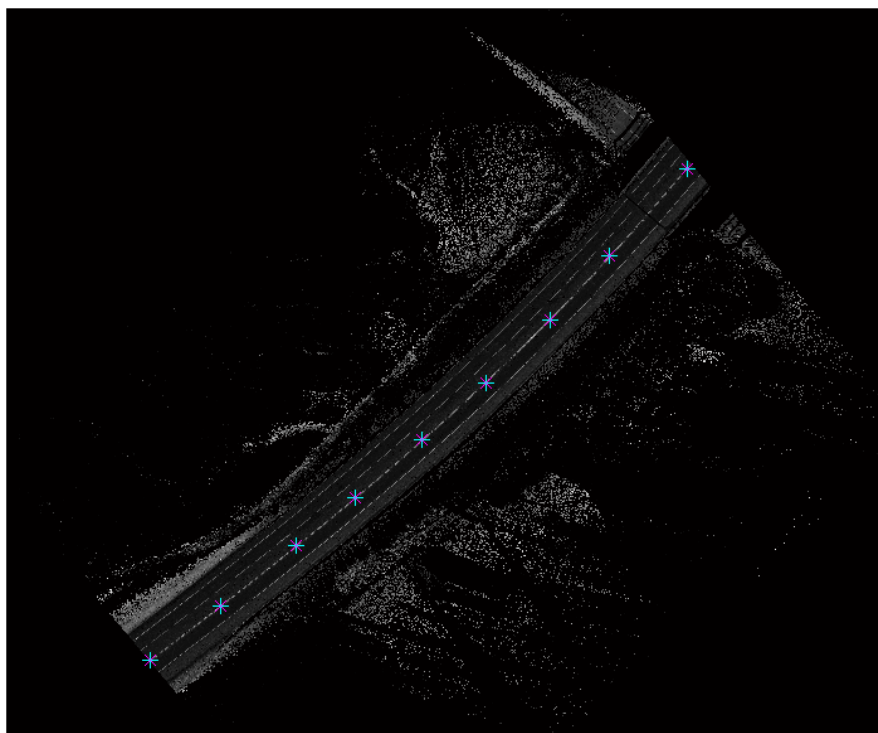


Figura 20 – Inserção dos pontos *seed* efectuada pelo utilizador que permitirá dividir o lote, neste caso, em 8 troços de menor dimensão.

Como se pode verificar na Figura 20, foram marcados 9 pontos *seed* de modo a serem criados 8 troços, onde o primeiro troço será definido pelo primeiro e segundo pontos marcados, o segundo troço pelo segundo e terceiro pontos *seed*, e assim sucessivamente. Desta operação resultam três vectores de dimensão 9x1 para os índices das linhas, colunas e valores de intensidade, respectivamente, de cada pixel marcado. Devem ser marcados tantos pontos *seed* quantos os necessários para dividir a estrada em segmentos rectos. Após a marcação dos pontos *seed* por selecção dos pixels no *raster* de intensidades, determinam-se novamente as suas coordenadas terreno através dos vectores de índices de linha e de coluna dos pontos *seed* criados no passo anterior e das equações (7) e (8). Adiciona-se em P e subtrai-se em M metade do valor da resolução do *pixel* pois considera-se o ponto determinado como o centro do *pixel*.

$$M_{seed} = (col_{seed} \times resol) - \frac{resol}{2} \quad (7)$$

$$P_{seed} = ((nlinhas - lin_{seed}) \times resol) + \frac{resol}{2} \quad (8)$$

De modo a se conhecerem as várias direcções da via ao longo do seu trajecto basta determinar a direcção da estrada em cada troço definido, calculando o rumo de um ponto *seed* para o seguinte através da equação (9), na qual ΔM corresponde à diferença de M_B por M_A , e ΔP à diferença de P_B por P_A . Tal operação é exemplificada na Figura 21.

$$\tan \theta = \frac{cat\ op}{cat\ adj} = \frac{abs(\Delta M)}{abs(\Delta P)} \quad (9)$$

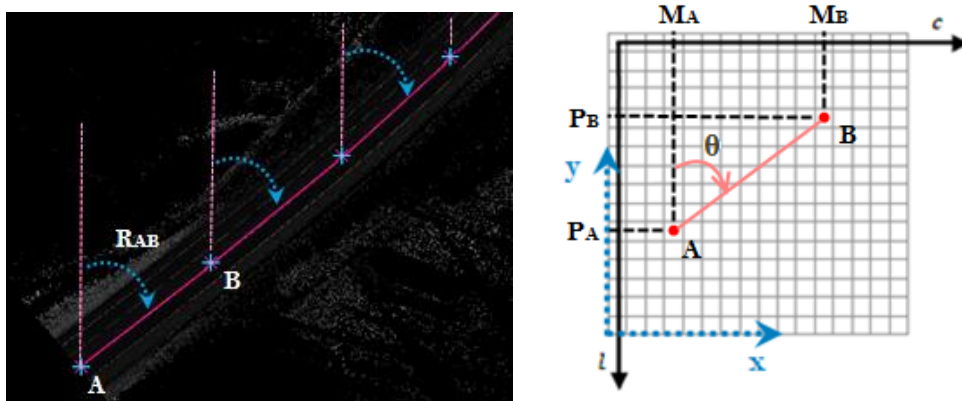


Figura 21 – À esquerda: representação do rumo de cada ponto *seed* para o seguinte; à direita: representação esquemática do cálculo do rumo.

Neste caso, os pontos *seed* foram marcados nos sentidos Sul-Norte e Oeste-Este, como pode ser verificado na Figura 21, o que faz com que o rumo de A para B se encontre no primeiro quadrante, correspondendo ao ângulo θ representado na imagem direita da Figura 21. No entanto, porque a marcação dos pontos pode ser feita no sentido que o utilizador desejar, é sempre feito o cálculo

auxiliar do valor de θ através da expressão (9), e só posteriormente, conforme os valores de ΔM e ΔP sejam positivos ou negativos, se determina o rumo. Os vários casos estão demonstrados na Figura 22 que deve ser interpretada juntamente com a Tabela 2.

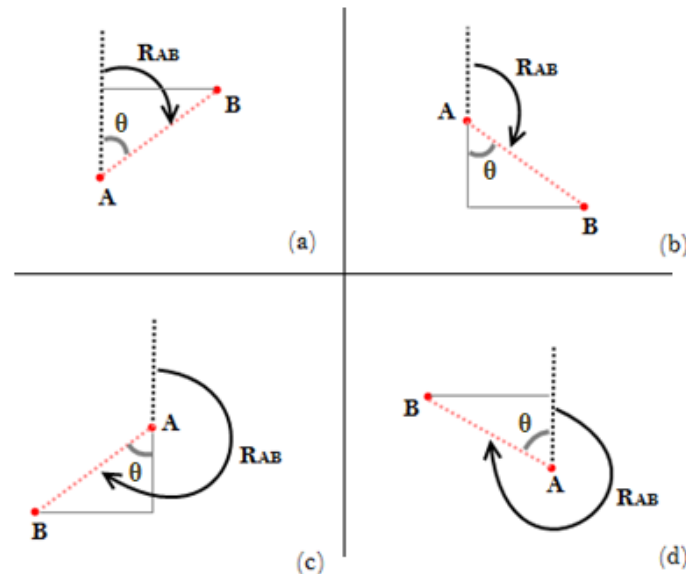


Figura 22 – Representação esquemática dos quatro casos possíveis da determinação do rumo através do cálculo auxiliar do ângulo θ .

Como se pode interpretar da Figura 22, apenas na situação (a) o rumo a determinar corresponde ao ângulo θ , pelo que nas restantes situações (b), (c) e (d) é necessária uma análise dos valores de ΔM e ΔP para que se possa adequar o rumo ao valor correcto, já que o rumo de um ponto para outro é sempre medido no sentido dextrogiro entre a direcção Norte-Sul e a referida direcção entre os pontos. Tal análise dos valores de ΔM e ΔP e respectiva resolução para o cálculo do rumo a partir de θ estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Cálculo do rumo consoante a direcção do troço.

Situação da Figura 22	Quadrante	ΔM	ΔP	Rumo
(a)	1º	+	+	$R_{AB} = \theta$
(b)	2º	+	-	$R_{AB} = \pi - \theta$
(c)	3º	-	-	$R_{AB} = \pi + \theta$
(d)	4º	-	+	$R_{AB} = 2\pi - \theta$

Após determinadas as coordenadas M e P de cada ponto *seed* somaram-se esses valores a x_{min} e a y_{min} da área de estudo de modo a enquadrá-las no sistema de coordenadas utilizado. Por fim, é armazenado em vector as direcções dos troços ao longo do lote.

3.5 Armazenamento da TIN

A triangulação de *Delaunay* é muito adequada para se conhecer o relacionamento espacial entre um conjunto de pontos, pois esta permite definir sobre um conjunto de dados uma relação de vizinhança. A rede irregular triangulada deve ser, então, armazenada numa estrutura que permita a fácil recuperação dos triângulos e das relações de vizinhança entre eles. Deste modo, a melhor forma de armazenar a triangulação consiste na utilização de tabelas, uma para armazenar as coordenadas dos nós usados na triangulação, uma segunda para armazenar os triângulos e os respectivos nós que os compõem, e uma terceira tabela para armazenar a topologia entre triângulos, isto é, a sua relação de vizinhança.

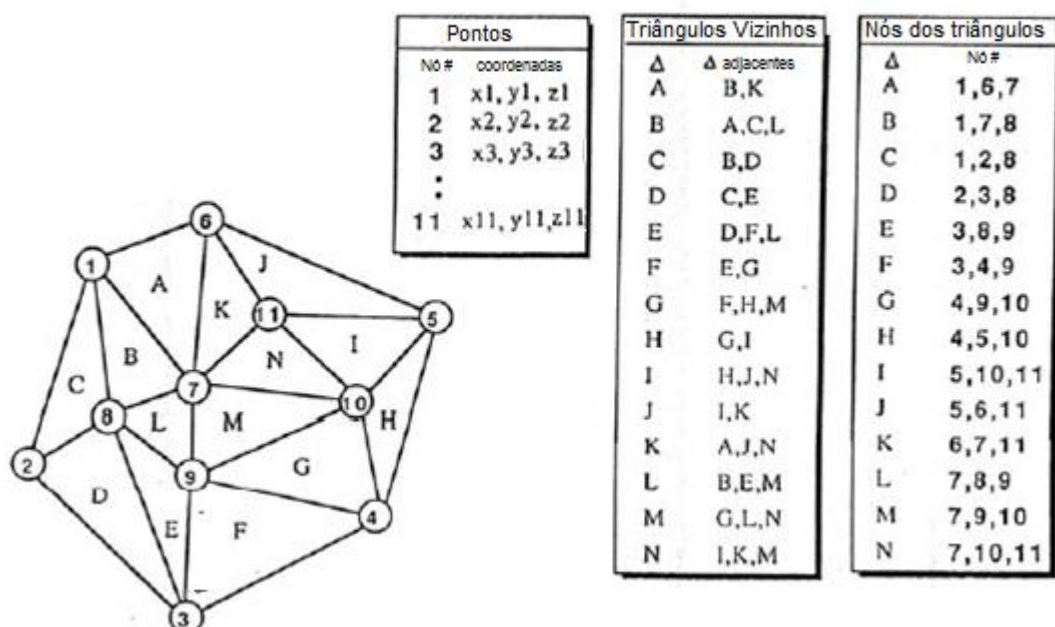


Figura 23 – A estrutura da TIN. Modelo topológico (à esquerda) e dados armazenados em tabelas de coordenadas dos pontos (tabela Pontos), tabela de triângulos definidos por pontos (tabela Nós dos triângulos) e tabela de triângulos e respectivos triângulos adjacentes (tabela Triângulos Vizinhos).

Partindo das coordenadas dos pontos levantados pelo sistema laser e classificados como terreno (*ground*), da estrutura TIN criada pelo processo de triangulação de *Delaunay* tem-se, então, fácil acesso a toda a informação sobre os vários triângulos que compõem a rede. A partir da análise das tabelas resultantes (ou ficheiros organizados como se verifica em baixo) sabe-se facilmente quais os nós que compõem cada triângulo, conhecem-se todos os triângulos vizinhos de cada triângulo e, por

leitura directa, sabe-se também quais os pontos comuns entre triângulos adjacentes pois a triangulação está organizada conforme se depreende da interpretação da Figura 23.

Nó ID	X	Y	Z	Intensidade
1	-20974.980	-11495.234	84.065	3
→ 2	-20974.810	-11495.264	84.168	19
3	-20974.242	-11497.333	79.913	27
→ 4	-20974.165	-11497.172	79.905	19
5	-20974.137	-11495.332	85.079	15
6	-20974.082	-11498.073	79.521	12
→ 7	-20973.952	-11497.014	79.839	16
8	-20973.868	-11494.619	83.671	16
9	-20973.651	-11494.650	83.745	13
10	-20972.713	-11499.324	77.561	2

Figura 24 – Exemplo do ficheiro de coordenadas e valor de intensidade de cada ponto da nuvem laser.

Triângulo ID	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Triângulo ID	TriViz 1	TriViz 2	TriViz 3
1	4	2	1	1	7	2	3
2	4	1	3	2	8	6	1
3	7	2	4	3	1	6	9
4	8	2	5	4	9	12	7
5	6	7	3	5	6	8	18
6	3	7	4	6	3	2	5
7	8	1	2	7	1	4	20
8	1	6	3	8	5	2	-1
9	7	5	2	9	4	3	11
10	10	11	18	10	16	14	25

Figura 25 – Exemplo dos ficheiros resultantes da triangulação de *Delaunay* (à esquerda) e da relação de vizinhança entre triângulos (à direita).

Das figuras 24 e 25 faz-se a seguinte leitura de exemplo, da triangulação de *Delaunay* resultou um triângulo de ID 3 (Figura 25, à esquerda) evidenciado a vermelho, constituído pelos pontos 7, 2 e 4 cujas coordenadas podem ser extraídas do ficheiro de coordenadas através dos seus respectivos índices, como mostram as setas a rosa na Figura 24. Do ficheiro de triângulos vizinhos, também para o terceiro triângulo da rede resultante se lê que os seus triângulos adjacentes são os de índices 1, 6 e 9, marcados a vermelho na Figura 25, à direita.

De notar que da triangulação de vizinhança, os triângulos que se encontram nas extremidades da rede de triângulos e que consequentemente apresentam arestas sem triângulos adjacentes, terão neste caso o valor -1 associado. Dá-se o valor -1 pois como não existem valores de identidade negativos não se corre o risco de dar um valor de ID já utilizado (Figura 25, à direita).

A relação de vizinhança entre os vários triângulos de *Delaunay* está armazenada de modo a que a leitura dos pontos comuns entre dois triângulos vizinhos seja feita directamente a partir das tabelas construídas.

Deste modo, o primeiro triângulo vizinho de um determinado triângulo terá sempre em comum com este o segundo e terceiro nós, o segundo triângulo vizinho terá sempre em comum com o triângulo em questão o primeiro e terceiro nós, e o terceiro triângulo vizinho terá sempre o primeiro e segundo nós em comum com o triângulo que estivermos a analisar.

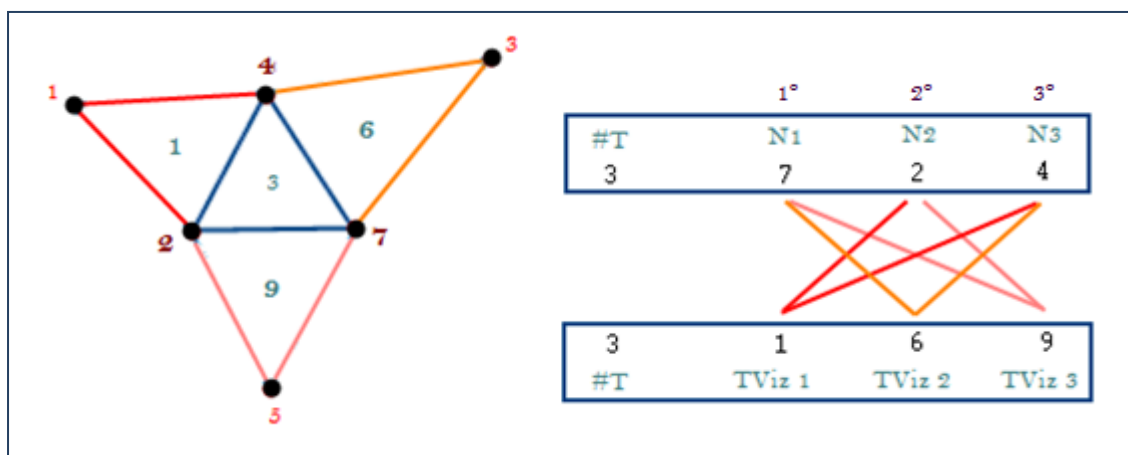


Figura 26 – Esquema representativo da relação dos pontos comuns entre triângulos vizinhos de um determinado triângulo.

Da figura acima, criada a partir da informação contida nas figuras 24 e 25, faz-se a seguinte leitura: o triângulo de índice (ou ID) 3 tem como triângulos vizinhos os triângulos de índices 1, 6 e 9. Por sua vez, o triângulo de ID 1 terá em comum com o triângulo 3 os nós ou pontos da nuvem de números identificadores 2 e 4, o triângulo de ID 6 terá em comum os pontos de ID 7 e 4, e o triângulo de ID 9 terá em comum com o triângulo 3 os nós 7 e 2. Para se saberem as coordenadas e valor de intensidade de cada nó referido basta procurar na tabela de nós as linhas do ficheiro correspondentes aos índices de cada ponto em questão, e assim, das linhas 7, 2 e 4 do ficheiro de nós acede-se à informação referente aos pontos de ID 7, 2 e 4.

Esta forma de armazenar informação relativamente à ordem dos nós entre triângulos vizinhos é importantíssima para o posterior acesso à TIN, pois desta forma é fácil e rápido saber que arestas são partilhadas por triângulos adjacentes, sem haver necessidade de se criar uma nova tabela de identificação de arestas.

Outro modo de armazenar uma TIN, consiste em fazê-lo não apenas em função dos triângulos mas em função também dos pontos e das arestas, como é demonstrado nas figuras 27 e 28 (Kreveld, 1996).

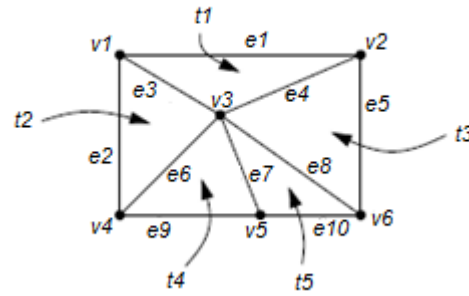


Figura 27 – Representação alternativa para o armazenamento da estrutura TIN.

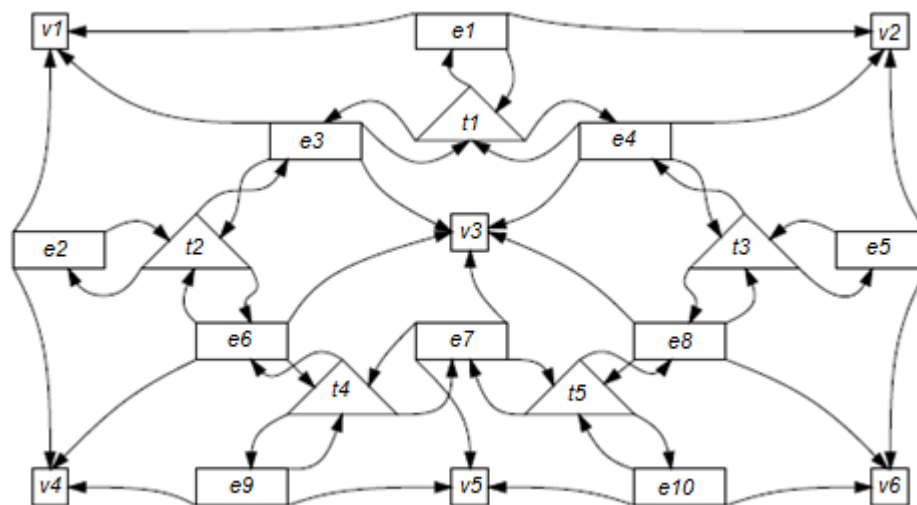


Figura 28 – Representação da estrutura da rede TIN alternativa e ilustração dos apontadores necessários ao armazenamento dos dados para posterior acesso directo.

Nesta estrutura alternativa, existe um registo para cada entidade, ou seja, cada triângulo t , aresta e e vértice ou nó v terá um registo na estrutura de dados. O registo de um triângulo t tem três campos com apontadores, apontando cada campo directamente para o registo de cada uma das arestas que compõem o triângulo t . O registo de uma aresta e tem quatro campos com apontadores, dois para os registos dos triângulos que partilham a aresta e , e outros dois para os registos dos vértices que a compõem. O registo de um vértice v tem quatro campos dos quais três são os valores das suas coordenadas x , y e z , contendo o quarto campo um apontador para uma lista. Esta lista, por sua vez, contém um elemento por cada aresta constituída pelo ponto v , elemento este que armazena um apontador para o registo da respectiva aresta.

Para a metodologia desenvolvida o primeiro modo de armazenamento da TIN é suficiente, facilitando o processo pelo facto de se ocupar menos espaço de memória com a informação necessária pois o segundo modo exige o armazenamento de uma maior quantidade de informação.

3.6 Acesso à TIN

Quando se pretende estimar a elevação de um determinado ponto q é necessário encontrar o triângulo da rede TIN que inclui o respectivo ponto, para que, posteriormente, se possa determinar a sua elevação através de algum método de interpolação. Se o MDT se tratasse de uma GRID o acesso a qualquer parte do terreno seria directo pois bastaria converter as coordenadas (x,y) do ponto nos respectivos índices da matriz de cotas. Já o modelo TIN, uma estrutura mais complexa, exige que se teste cada triângulo até se encontrar o triângulo que contém o ponto que se procura. Este processo é obviamente ineficiente pelo que é importante rever alguns métodos de acesso a um determinado ponto a partir de uma estrutura TIN. Seguidamente são descritos os dois métodos mais frequentemente utilizados de se aceder a uma TIN, o método de acesso usando árvores (*quadtrees*) e a estratégia *jump-and-walk*.

Uma *quadtree* consiste numa estrutura de dados em árvore na qual cada nó terá quatro descendentes. As estruturas em árvores são frequentemente utilizadas para particionar um espaço bidimensional, subdividindo-o recursivamente em quatro quadrantes ou regiões. Cada uma das quatro sub-regiões é decomposta noutras quatro sub-regiões mais pequenas que a que lhes deu origem. A decomposição do espaço pára logo que os dados que calham dentro das subregiões são simples o suficiente para os manipular de uma maneira fácil. Os dados ficam armazenados numa folha da árvore, isto é, numa subregião mínima do espaço que foi dividido, havendo ligação com as subregiões que lhes deram origem através dos ramos da *quadtree*. Estas estruturas de indexação podem, então, ser utilizadas para se obter acesso eficiente a um ponto específico a partir de uma TIN, sendo necessário primeiramente armazenar toda a estrutura triangular numa *quadtree*. Para tal, começa-se por considerar um quadrado em torno da TIN, quadrado este que corresponde à raiz da *quadtree*. E duas linhas, uma horizontal e uma vertical, que dividem o quadrado em quatro regiões. Todos os triângulos que intersectam estas linhas são armazenados no nó raiz da árvore e todos os outros que se encontram totalmente contidos numa das quatro sub-regiões são armazenados num dos quatro nós descendentes do nó raiz que as representam. Recursivamente cada sub-região é dividida com outras duas linhas e o critério de armazenamento repete-se. Outra possibilidade é considerar o menor rectângulo envolvente a cada triângulo, tendo todos os rectângulos eixos paralelos. O conjunto de rectângulos resultantes apresentará sobreposição entre rectângulos, no entanto, pode-se esperar que para um ponto não haverá muitos rectângulos que o contenham. Posto isto, os rectângulos são igualmente armazenados numa *quadtree* e a busca de um ponto na TIN é feita correndo a árvore desde o nó raiz até se chegar ao nó ou sub-região em que o ponto se insere. Por fim, basta testar os triângulos que destes rectângulos de modo a se encontrar o triângulo que contém o ponto que se procura.

A estratégia *Jump-and-walk* é, de longe, o método mais simples de localizar um ponto numa TIN, no entanto exige que se parta de um ponto cujo triângulo que o contém seja conhecido (Kreveld, 1996). A ideia principal consiste em usufruir do conhecimento que se tem da topologia da rede no que diz respeito à relação de vizinhança entre triângulos, pelo que, partindo do ponto conhecido, atravessa-se a TIN percorrendo em linha recta o caminho que liga o ponto conhecido ao ponto procurado. Começa-se, então, por identificar qual a aresta do triângulo ($t1$ da Figura 29), que contém o ponto de partida (ponto azul da Figura 29), que intersecta o segmento de recta (seta a tracejado da Figura 29) que une o ponto de partida ao ponto procurado. Através da topologia da rede, conhecendo essa aresta sabe-se qual o próximo triângulo a ser analisado (triângulo $t2$ da Figura 29) verificando-se se este triângulo contém o ponto procurado (ponto rosa da Figura 29). Caso o contenha, o processo pára e devolve-se o ID do triângulo em causa, caso isso não se verifique o processo repete-se, determinando-se qual a aresta deste novo triângulo intersecta o segmento de recta de forma a se identificar o próximo triângulo a analisar, e assim sucessivamente. O teste de verificação de ponto contido em triângulo é realizado consecutivamente até se identificar o triângulo que o contém.

Com base na estratégia *jump-and-walk* procedeu-se a outra estratégia verificando se o segmento de recta que une o ponto inicial ao ponto procurado intersecta duas arestas de cada triângulo. Caso tal aconteça significa que o segmento atravessa o triângulo e, logo, o ponto procurado não se encontra no seu interior sendo escusada essa verificação. Deste modo, apenas o triângulo no qual o segmento de recta intersecta apenas uma das arestas, implica que o ponto procurado se encontra no seu interior efectuando-se posteriormente o teste para verificar se o triângulo contém o ponto procurado.

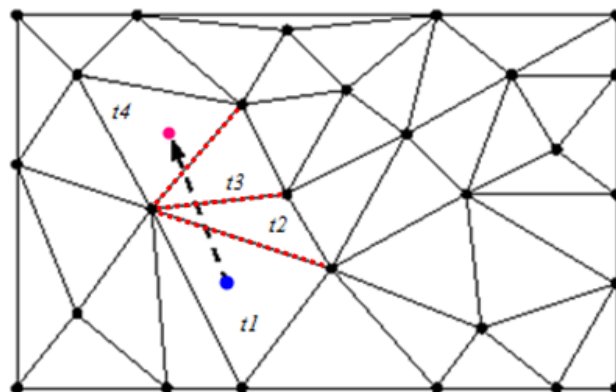


Figura 29 – Representação esquemática do método *Jump-and-walk*.

Consecutivamente há que, então, determinar se o segmento de recta intersecta as arestas dos triângulos que se sobrepõem ao segmento. Para tal, utilizou-se um operador de relacionamento de elementos lineares como é o caso da intersecção de linhas. Nesta verificação, as duas linhas a testar serão o segmento de recta que liga o ponto inicial ao ponto procurado e uma aresta de um triângulo a analisar, linha esta definida pelos respectivos dois nós do triângulo que a compõem.

Para determinar se dois segmentos se intersectam ou não, podem seguir-se dois procedimentos (Matos, 2008):

- Determinar o ponto de intersecção das duas rectas e verificar se o ponto resultante pertence aos segmentos analisados;
- Pesquisar pelos parâmetros t e s , verificando quando estão simultaneamente compreendidos entre 0 e 1.

Uma linha definida por dois pontos $A: (x_A, y_A)$ e $B: (x_B, y_B)$ intersecta uma linha definida por dois pontos $C: (x_C, y_C)$ e $D: (x_D, y_D)$ no ponto de coordenadas x_i e y_i definidas por:

$$x_i = \frac{(y_C x_D - x_C y_D)(x_A - x_B) - (y_A x_B - x_A y_B)(x_C - x_D)}{(y_B - y_A)(x_C - x_D) - (y_D - y_C)(x_A - x_B)} \quad (10)$$

$$y_i = \frac{(y_A x_B - x_A y_B)(y_A - y_B) - (y_C x_D - x_C y_D)(y_C - y_D)}{(y_B - y_A)(x_C - x_D) - (y_D - y_C)(x_A - x_B)} \quad (11)$$

Considerando que o objectivo é determinar se dois segmentos de recta se intersectam ou não, não sendo necessário identificar exactamente o ponto onde tal acontece, o mais conveniente é utilizar uma representação paramétrica da recta, recorrendo a um parâmetro que varia entre 0 e 1 entre os extremos do segmento. Deste modo, através das equações (12) e (13), os dois segmentos de recta a avaliar podem ser definidos, associando o parâmetro s ao segmento de recta \overline{AB} e o parâmetro t ao segmento de recta \overline{CD} .

$$\begin{cases} x = x_A + s(x_B - x_A) \\ y = y_A + s(y_B - y_A) \end{cases}, 0 \leq s \leq 1 \quad (12)$$

$$\begin{cases} x = x_C + t(x_D - x_C) \\ y = y_C + t(y_D - y_C) \end{cases}, 0 \leq t \leq 1 \quad (13)$$

Na intersecção dos dois segmentos, os valores dos parâmetros t e s são dados pelas equações (14) e (15).

$$s = \frac{(x_D - x_C)(y_C - y_A) - (y_D - y_C)(x_C - x_A)}{(x_D - x_C)(y_B - y_A) - (y_D - y_C)(x_B - x_A)} \quad (14)$$

$$t = \frac{(x_B - x_A)(y_C - y_A) - (y_B - y_A)(x_C - x_A)}{(x_D - x_C)(y_B - y_A) - (y_D - y_C)(x_B - x_A)} \quad (15)$$

Se os parâmetros s e t estiverem simultaneamente contidos entre 0 e 1, então ocorre intersecção, caso contrário, e para tal basta um dos parâmetros não estar contido no intervalo, a intersecção entre os segmentos não se verifica.

3.7 Ponto contido em triângulo

Após a identificação do suposto triângulo que conterá o ponto procurado é necessário confirmar se de facto o ponto está contido nesse triângulo. Para verificar se um determinado ponto está contido no triângulo utilizou-se a técnica baricêntrica.

Qualquer ponto P sobre um plano pode ter as suas coordenadas descritas em função da combinação linear de três pontos não colineares sobre esse plano, os pontos A , B e C . Os coeficientes usados nessa combinação linear, normalizados por definição, são denominados coordenadas baricêntricas, representadas normalmente por $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, pelo que o ponto P do plano pode ser escrito na forma $P = \lambda_1 A + \lambda_2 B + \lambda_3 C$, onde $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$.

No contexto de um triângulo, as coordenadas baricêntricas são também conhecidas como coordenadas areais pois as coordenadas de P relativamente ao triângulo ABC são proporcionais às áreas dos triângulos PBC , APC e ABP , apresentando-se do seguinte modo:

$$\lambda_1 = \frac{\text{area}(PBC)}{\text{area}(ABC)} \quad \lambda_2 = \frac{\text{area}(APC)}{\text{area}(ABC)} \quad \lambda_3 = \frac{\text{area}(ABP)}{\text{area}(ABC)} \quad (16)$$

Porque do produto vectorial de dois vectores que definem o triângulo resulta a área de um paralelogramo com os lados definidos pelos vectores, metade desse valor corresponderá à área do triângulo em questão. Deste cálculo dos produtos externos, caso a área resulte negativa significa que os pontos dos triângulos se encontram no sentido horário, caso resulte positiva, os pontos encontram-se no sentido anti-horário.

O sistema assim concebido permite estabelecer a posição relativa (interno, externo ou sobre o perímetro) entre um ponto definido num espaço 2D e um triângulo definido pelos seus três vértices. Pontos localizados sobre os lados de um triângulo possuem uma das coordenadas baricêntricas (aquela relativa ao vértice oposto ao lado) nula, pontos coincidentes com um dos vértices apresentam duas coordenadas baricêntricas (aquelas relativas aos demais vértices) nulas e, portanto, uma unitária (Apostol, 1985).

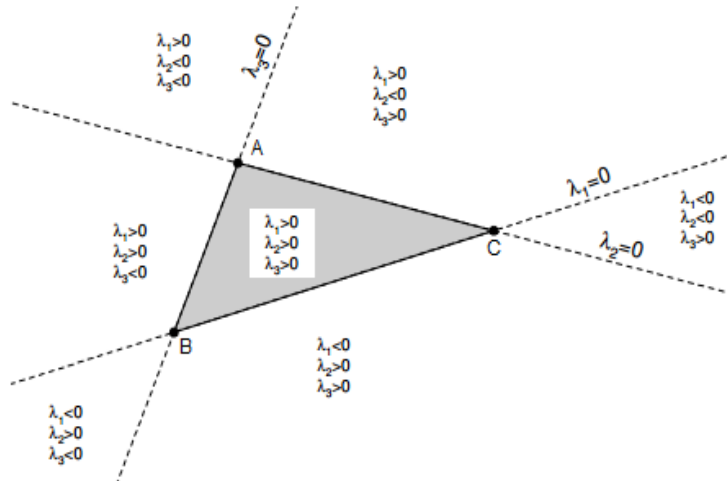


Figura 30 – Sinais das coordenadas baricêntricas.

Um modo mais intuitivo e que facilita a percepção desta análise consiste em colocar o ponto P em função de dois vectores definidores do triângulo e de um ponto de aplicação (Burkardt, 2010). Para tal, considerando que os três vértices do triângulo definem um plano no espaço, selecciona-se um dos três pontos para ser tomado como ponto origem, considerando-se todas as localizações no plano relativamente a esse ponto. Assim, na Figura 31, o vértice A será o ponto origem. Considerando as arestas AB e AC como definidoras da direcção dos vectores a considerar, partindo de A , \vec{u} e \vec{v} , serão os vectores base para a definição de qualquer ponto no plano. Note-se que, se o ponto P se encontrar sobre B , $\|\vec{u}\|$ tomará o valor 1 que será igual à coordenada λ_2 nesta situação, pois a área do triângulo APC será igual à área do triângulo ABC . Do mesmo modo, se P se encontrar sobre C , $\|\vec{v}\|$ tomará o valor 1, a área do triângulo ABP será igual à de ABC , pelo que daqui se depreende que v corresponderá a λ_3 .

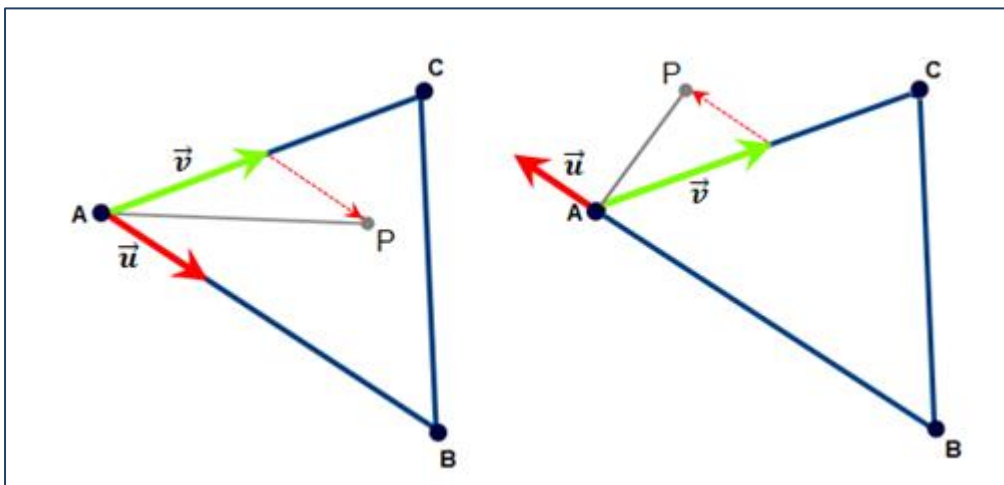


Figura 31 – Esquema explicativo da técnica baricêntrica do teste do ponto no triângulo.

Mantendo as considerações anteriores, através da equação (17) é possível descrever qualquer ponto sobre o plano:

$$P = A + v * \overrightarrow{AC} + u * \overrightarrow{AB} \quad (17)$$

$$P = A + v * (C - A) + u * (B - A) \quad (18)$$

Note-se que, se u ou v são inferiores a 0 então é porque se andou no sentido errado e encontramos-nos fora do triângulo. Da mesma forma, se u ou v são superiores a 1, então andou-se demais no outro sentido e está-se igualmente fora do triângulo. Finalmente, através da propriedade das coordenadas baricêntricas $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$, sabe-se que $u + v$ nunca poderá ultrapassar a unidade, quanto muito poderá tomar o valor de 1 onde, neste caso, o ponto P encontrar-se-á sobre a aresta BC pois anula-se a coordenada λ_1 . Assim, se $u + v > 1$, então, ter-se-á cruzado a aresta \overline{BC} , saindo-se novamente do triângulo.

Tendo em conta que se pretende determinar dois parâmetros, u e v , implica que se construam duas equações para se resolver o problema. Assim, subtraindo A em ambos os lados da equação (18), obtém-se a equação (19).

$$\overrightarrow{AP} = v * \overrightarrow{AC} + u * \overrightarrow{AB} \quad (19)$$

Multiplica-se a expressão resultante, em ambos os lados, por \overrightarrow{AC} para se obter uma primeira equação necessária, equação (22), e posteriormente por \overrightarrow{AB} de forma a se obter a segunda equação necessária à resolução do sistema, equação (23).

$$\begin{aligned} \overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AC} &= (v * \overrightarrow{AC} + u * \overrightarrow{AB}) \cdot \overrightarrow{AC} \Rightarrow \\ \Rightarrow \overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AC} &= v * (\overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{AC}) + u * (\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AC}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AB} &= (v * \overrightarrow{AC} + u * \overrightarrow{AB}) \cdot \overrightarrow{AB} \Rightarrow \\ \Rightarrow \overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AB} &= v * (\overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{AB}) + u * (\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AB}) \end{aligned} \quad (21)$$

Tendo as duas equações basta resolver uma equação em ordem a uma das duas variáveis, substituindo-a, posteriormente, na outra equação para determinar o segundo parâmetro (Davis, et al., 2001).

Desta forma, obtêm-se as equações directas para o cálculo de u e v , equações (22) e (23) respectivamente.

$$v = \frac{(\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AB})(\overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AC}) - (\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AC})(\overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AB})}{(\overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{AC})(\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AB}) - (\overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{AB})(\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AC})} \quad (22)$$

$$u = \frac{(\overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{AC})(\overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AB}) - (\overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{AB})(\overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AC})}{(\overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{AC})(\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AB}) - (\overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{AB})(\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AC})} \quad (23)$$

Determinados u e v , se $u \geq 0$, $v \geq 0$ e $(u + v) < 1$, então o ponto avaliado está contido no triângulo testado, caso contrário, basta um destes critérios falhar para o ponto estar fora do triângulo.

3.8 Cálculo da equação do plano do triângulo

Após a identificação do triângulo em que um ponto supostamente estará contido e realizada a sua confirmação através do teste do ponto contido em triângulo, pretende-se determinar a cota correspondente desse ponto através da sua projecção no plano do respectivo triângulo. Para cada triângulo de *Delaunay* é, então, calculada previamente a equação do seu plano que é definida geometricamente pelos três pontos que formam o triângulo.

Uma das formas clássicas de se obter a equação de um plano β em R^3 é através de um vector normal (ortogonal) a β , $\vec{N} = (a, b, c)$, e de um qualquer ponto $P_0(x_0, y_0, z_0)$ sobre este plano.

A equação cartesiana ou geral do plano β é dada pela equação (24) onde os coeficientes a, b e c de x, y e z são as componentes do vector normal \vec{N} .

$$\beta : ax + by + cz + d = 0 \quad (24)$$

Para o cálculo da equação do plano de cada triângulo de *Delaunay* basta, então, determinar as componentes do vector normal a cada triângulo e, utilizando qualquer um dos três pontos que definem um triângulo, determinar o coeficiente d , através da equação (25).

$$d = -ax_0 - by_0 - cz_0 \quad (25)$$

3.8.1 Vector normal

O vector normal $\vec{N} = (a, b, c)$ referido no ponto anterior, seguidamente apresentado por $\vec{N} = (n_x, n_y, n_z)$, quando em domínios tridimensionais, por definição é aquele que faz 90° , ou seja, é perpendicular, a uma dada superfície à qual se refere. Para um triângulo definido pelos pontos A, B e C de coordenadas tridimensionais, Figura 32, um vector perpendicular ao plano do triângulo é um vector simultaneamente ortogonal aos vectores \vec{AB} , equação (26), e \vec{AC} , equação (27). Pelas propriedades do produto vectorial sabe-se que do produto externo de \vec{AB} com \vec{AC} resulta um vector ortogonal aos dois. Desta forma, determinando dois vectores de um triângulo qualquer a partir dos seus três pontos definidores, basta calcular o seu produto vectorial e facilmente se obtêm as três componentes do vector normal ao triângulo, (n_x, n_y, n_z) .

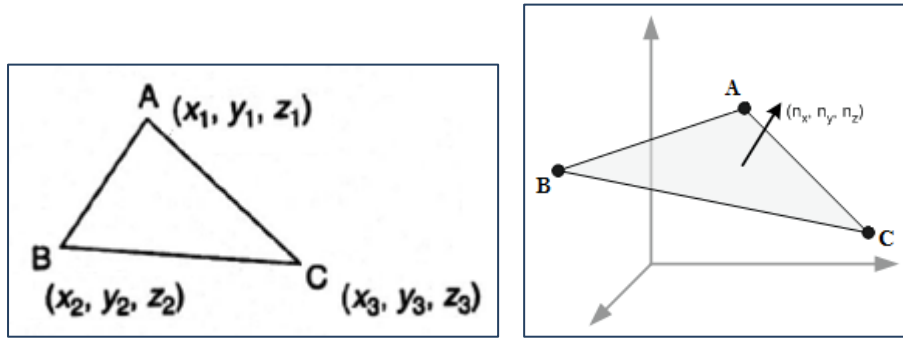


Figura 32 – Esquema de um triângulo definido em R3.

$$\vec{AB} = B - A = ((x_2 - x_1), (y_2 - y_1), (z_2 - z_1)) \quad (26)$$

$$\vec{AC} = C - A = ((x_3 - x_1), (y_3 - y_1), (z_3 - z_1)) \quad (27)$$

As coordenadas do resultado do produto externo dos dois vectores podem ser facilmente calculadas sem a necessidade de se determinar o ângulo entre os dois vectores. Para tal, considerando agora \vec{AB} como \vec{u} e \vec{AC} como \vec{v} , o vector normal pode ser calculado através do determinante da seguinte matriz demonstrada na equação (28), onde $\vec{u} = a_1\vec{i} + a_2\vec{j} + a_3\vec{k}$ e $\vec{v} = b_1\vec{i} + b_2\vec{j} + b_3\vec{k}$.

$$\vec{u} \times \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_2 & a_3 \\ b_2 & b_3 \end{vmatrix} \vec{i} - \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ b_1 & b_3 \end{vmatrix} \vec{j} + \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \vec{k} \quad (28)$$

$$\vec{u} \times \vec{v} = (a_2b_3 - a_3b_2)\vec{i} - (a_1b_3 - a_3b_1)\vec{j} + (a_1b_2 - a_2b_1)\vec{k} \quad (29)$$

Deste modo através da equação (30), de uma forma simplificada se depreende que dos vectores \overrightarrow{AB} e \overrightarrow{AC} , facilmente se calculam as componentes do vector normal $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ aos dois vectores e por isso ao plano do triângulo, através das equações (26) e (27) aplicadas à equação (29).

$$\begin{cases} a = n_x = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1)(z_2 - z_1) \\ b = n_y = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - x_1) \\ c = n_z = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) \end{cases} \quad (30)$$

Uma vez determinados todos os coeficientes que definem o plano de cada triângulo, é possível calcular o valor de cota de qualquer ponto (x, y) através da sua projecção no plano do triângulo, substituindo os valores de x, y na equação (24) e resolvendo em ordem a z (Davis, et al., 2001).

3.9 Definição dos perfis transversais

A estratégia de localização de um ponto na TIN, *Jump-and-walk*, foi o método escolhido para ser utilizado neste trabalho. No entanto, como foi referido anteriormente este método de localização obriga a que se conheça o triângulo que contém o ponto de partida para a busca de um determinado ponto. Deste modo, porque no desenvolvimento do projecto vão ser procurados inúmeros pontos ao longo de perfis, optou-se por realizar um processo um pouco menos expedito para a localização do primeiro ponto.

A estratégia utilizada para a localização do primeiro ponto na TIN foi efectuada da seguinte forma:

1. Calcularam-se os centros geométricos de todos os triângulos da TIN, através das equações (31) e (32), onde i diz respeito a cada um dos vértices de cada triângulo;

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^3 x_i}{3} \quad (31)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i}{3} \quad (32)$$

2. Calcularam-se as distâncias euclidianas do primeiro ponto *seed* (que se pretende localizar na TIN) para todos os centros geométricos determinados através da equação (33);

$$d = \sqrt{(x_c - x_{seed})^2 + (y_c - y_{seed})^2} \quad (33)$$

3. Determinou-se a menor distância seleccionando-se o centro geométrico mais próximo do ponto a localizar;
4. Aplicou-se o método de localização *jump-and-walk* partindo do centro geométrico determinado anteriormente até ao primeiro ponto *seed* procurado.

Localizado na TIN o primeiro ponto *seed*, todos os restantes, pontos *seed* ou não, serão localizados também pela estratégia *jump-and-walk*. O ponto *seed* do perfil seguinte é localizado partindo do ponto *seed* do perfil anterior, e os pontos de perfil são localizados partindo do ponto *seed* do respectivo perfil para o primeiro ponto do perfil, sendo todos os restantes localizados a partir do ponto de perfil identificado imediatamente antes. O processo é bastante expedito sendo cada perfil, com cerca de 2500 pontos, construído tridimensionalmente em cerca de 5 segundos. Assim, estabelecendo um determinado intervalo entre pontos amostrais, neste caso optou-se por um intervalo de 0.01 m, as coordenadas x e y de cada ponto do perfil são determinadas tendo em conta a direcção da estrada, obrigando a que se busque cada ponto amostral perpendicularmente à direcção do troço e a uma distância iterativamente somada desse intervalo. Assim, e naturalmente, quanto menor o intervalo definido inicialmente maior será a frequência de amostragem e maior a quantidade de pontos para definir um perfil. Na Figura 33, está representado o primeiro perfil de cada troço.

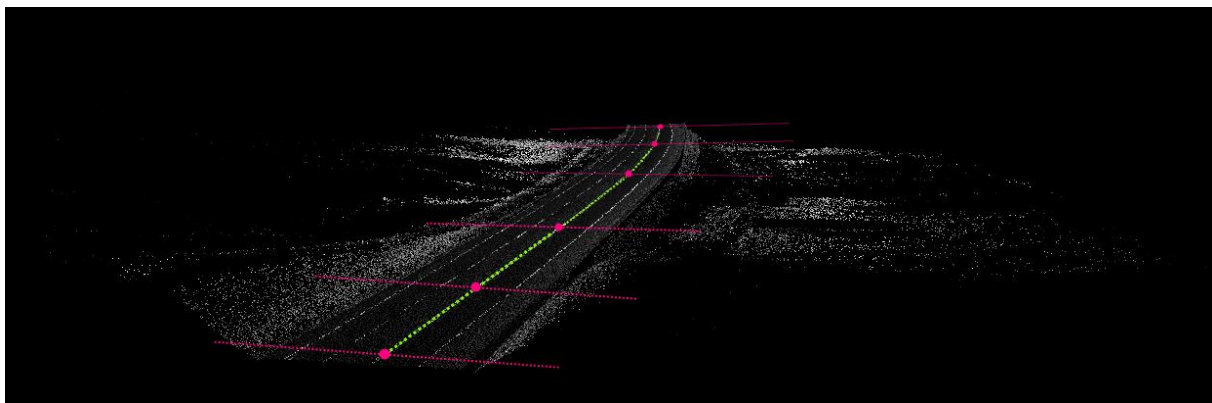


Figura 33 – Definição dos perfis transversais à estrada, apenas representando o primeiro perfil de cada troço. Pontos rosa cheios: pontos *seed* marcados pelo utilizador.

Tendo os valores de x e y de cada ponto amostral é possível proceder-se à localização de cada um dos pontos na TIN pelo método *jump-and-walk*, que após localizados é calculado o valor da sua cota pela respectiva projecção no plano do triângulo em que constam. Para além da cota é também determinado um valor de intensidade para cada ponto do perfil, calculando a média das intensidades dos vértices que compõem o triângulo em que cada ponto se encontra.

Dentro de cada troço, a cada metro é determinado um novo perfil, sendo cada troço reamostrado por uma série de perfis.

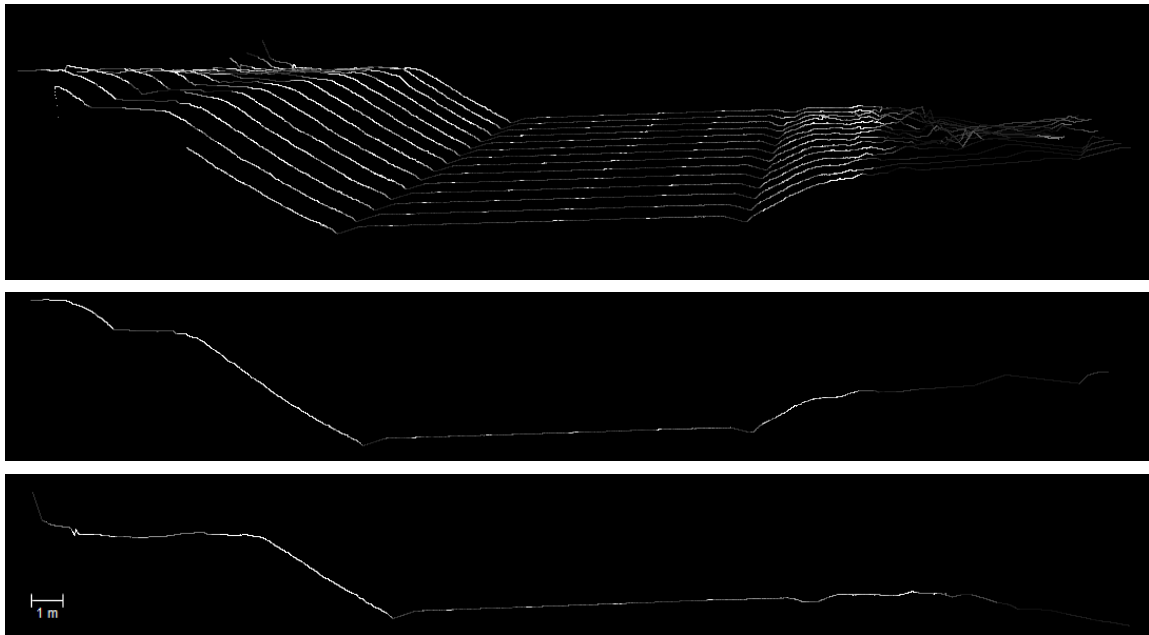


Figura 34 – Resultado da operação de perfilamento de um troço de estrada. Como exemplo, estão representados isoladamente o quarto e último perfis do troço.

Quanto menor o intervalo entre perfis estipulado, maior o número de perfis será efectuado dentro de um troço. Na Figura 34 está representado o resultado do processo de perfilamento para o primeiro troço ilustrado na Figura 33 limitado pelos dois primeiros pontos *seed* representados a pontos rosa. Deste modo é possível associar-se a cada ponto amostral um valor de reflectância aproximado definido pela intensidade dos seus três pontos mais próximos (os 3 vértices do triângulo que o contém), pontos estes que, como se sabe, são pontos obtidos directamente pelo laser.

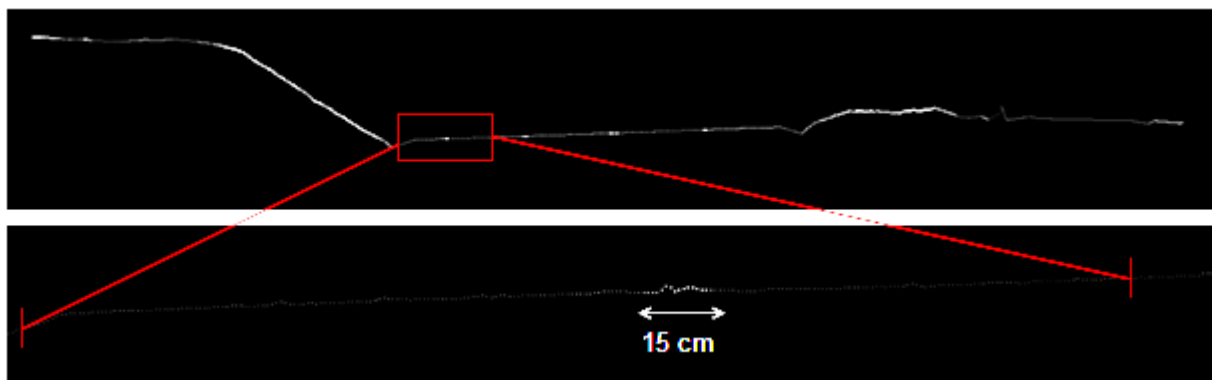


Figura 35 – Em cima: perfil transversal obtido com um intervalo de amostragem de 0.01 m, constituído por 5000 pontos, cada um representado por um valor de cinzento associado ao respectivo valor de intensidade determinado. Em baixo: pormenor aumentado da imagem de cima, no qual é possível visualizar cada ponto isoladamente.

Na imagem de baixo da Figura 35, os pontos mais claros distribuídos a longo dos 0.15 m marcados na imagem correspondem à marcação rodoviária guia, ou seja, sinalização horizontal que delimita a via, a

qual também corresponde a um elemento a vectorizar. Estas são facilmente identificáveis nas imagens intensidade pois a sua reflectância é extremamente elevada quando comparada com a do betuminoso envolvente.

3.10 Redução da dimensão amostral de um perfil

Entende-se por simplificação o processo de esquematização dos objectos do mundo real, buscando a representação gráfica dos dados geográficos mantendo, porém, a aparência semelhante ao original. Quando se fala, então, em simplificar a representação gráfica de um elemento geográfico no formato vectorial, associa-se à eliminação de alguns pontos que o compõem, diminuindo o tamanho da amostra, tornando a representação numa demonstração mais simples.

Existem várias metodologias de simplificação nomeadamente, a simplificação pelo número de pontos, na qual são mantidos o primeiro e últimos pontos que compõem a representação gráfica do elemento e os pontos cuja ordem da posição seja múltiplo de um valor pré-definido; a simplificação pela distância entre os pontos ao longo da linha, também designada por algoritmo de tolerância linear, na qual é armazenado o primeiro ponto da amostra e a partir dele calcula-se o somatório das distâncias dos segmentos de rectas subsequentes até que esse somatório seja maior que uma dada tolerância, voltando o somatório a zero quando tal acontece e armazenando-se o último ponto lido para ser usado como início do segmento de recta que irá compor o novo somatório. Estas duas metodologias são muito fáceis de implementar, no entanto, apresentam um grande problema que consiste no facto de a eliminação dos pontos se basear apenas num critério linear muito simples não entrando em linha de conta com a variação do ponto relativamente aos seus vizinhos. Esta característica fará com que um ponto importante na definição da forma de um elemento seja eliminado simplesmente porque é seleccionado quando se utiliza um determinado valor pré-definido de contagem de pontos ou de distância (Cordeiro, et al., 2002).

Para evitar tal facto, surgem metodologias como o método de *Douglas-Peucker*, que procuram identificar pontos definidores dos elementos a simplificar, analisando cada ponto relativamente à sua vizinhança. Neste trabalho optou-se por implementar o algoritmo *Douglas-Peucker* na etapa de simplificação da dimensão amostral de cada perfil pois, como se refere no ponto 2.3 do capítulo da fundamentação teórica, este método permite manter a morfologia do elemento original reduzindo significativamente o tamanho da amostra, o que facilitará bastante as posteriores operações de análise de perfis.

Seguidamente é demonstrado um perfil da estrada em estudo, obtido pela metodologia descrita anteriormente com um intervalo entre pontos de 0.01 m, resultando num total de 5000 pontos (a verde

na Figura 36), e o resultado do mesmo perfil submetido à operação de simplificação pela aplicação do algoritmo *Douglas-Peucker* com uma tolerância de 0.001 m, da qual derivou um perfil definido por 1808 pontos (a lilás na Figura 36), verificando-se uma diminuição de 3192 pontos apenas num perfil. Foram, então, mantidos os pontos importantes que definem o comportamento do perfil verificando-se uma significativa redução da sua dimensão amostral.

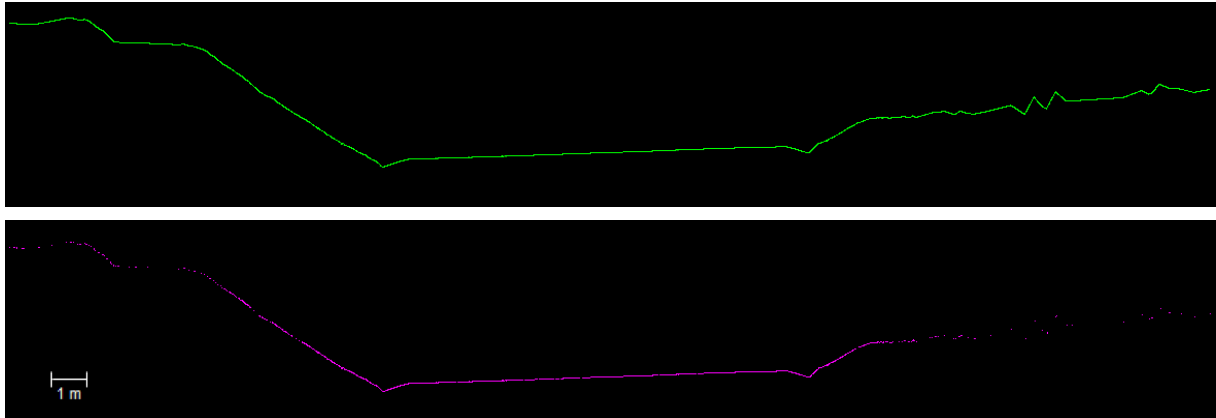


Figura 36 – Em cima: a verde um perfil original de 5000 pontos. Em baixo: a lilás o perfil simplificado de 1808 pontos.

3.11 Detecção de pontos definidores

Realizada a simplificação dos perfis, operação que tornará bastante eficientes os próximos passos, é possível iniciar-se a etapa de detecção dos pontos definidores dos vários elementos de um perfil transversal de uma estrutura rodoviária. A Figura 37 ilustra os elementos que se pretendem obter automaticamente, nomeadamente valetas (a lilás), limites de plataforma (a verde) e guias da estrada (a vermelho). As linhas ilustradas na Figura 37 correspondem às linhas obtidas por vectorização manual directa sobre os pontos laser.

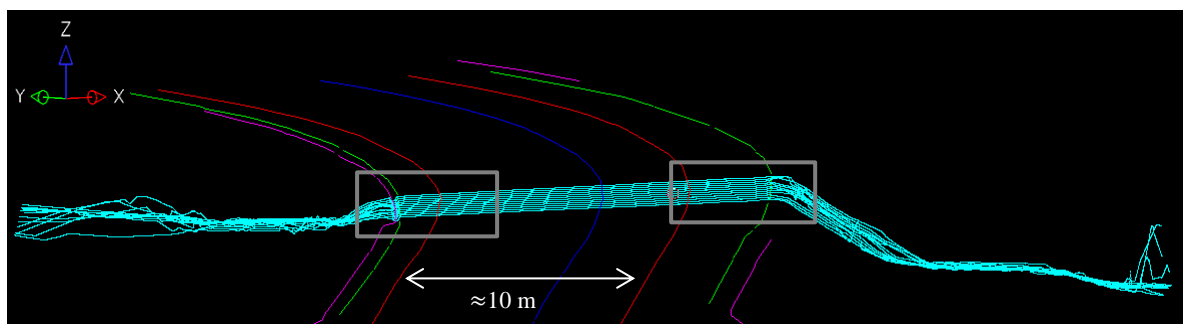


Figura 37 – Perfis sobrepostos às linhas obtidas manualmente.

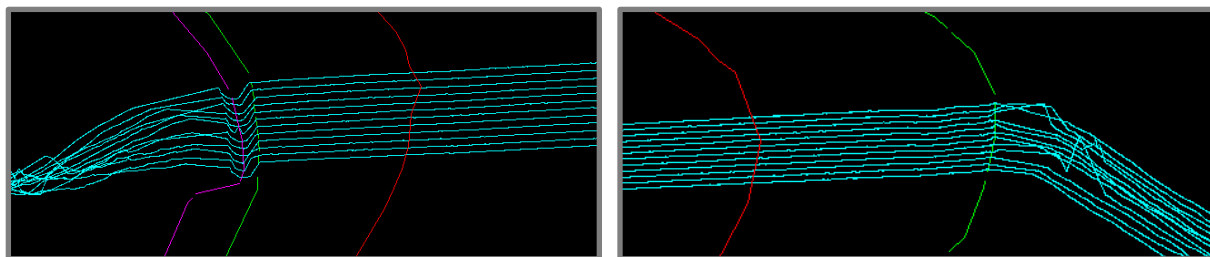


Figura 38 – Pormenores aumentados da área compreendida pelos rectângulos a cinzento da figura anterior ilustrando os limites esquerdo e direito da estrada.

A detecção dos pontos é feita perfil a perfil, sendo que, em cada um é detectado em primeiro lugar o limite de plataforma e só depois, e a partir deste ponto definidor, será procurado o ponto definidor de valeta.

Todo o trabalho anterior de construção dos perfis transversais foi sempre realizado duas vezes em cada perfil, uma para cada lado da linha *seed* marcada inicialmente, pelo que a procura de pontos definidores não fugirá à regra, sendo sempre feita uma primeira busca para o lado esquerdo da linha *seed*, identificando-se os pontos definidores esquerdos, e uma segunda busca para o lado direito da estrada, identificando os pontos definidores direitos.

Nesta análise serão considerados alguns valores normativos relativos ao desenho geométrico de uma estrutura rodoviária do tipo IC. Estas dimensões especificadas pelas disposições normativas para o traçado dos perfis transversais de vias de comunicação do tipo IC estão descritas em anexo.

De forma a se fazer uma análise de perfil, uma vez que os perfis são obtidos tridimensionalmente, é necessário transformá-los de forma a que estes se desenvolvam ao longo do eixo dos xx , apresentando como variabilidade no eixo dos yy a cota de cada ponto, sendo, assim, possível uma análise bidimensional simples. Para tal, a transformação necessária consistirá em rodar todos os pontos um certo ângulo de modo que o eixo dos xx corresponda à direcção perpendicular à direcção da estrada. Assim, basta atribuir os valores de cota ao eixo dos yy e tem-se os perfis visualizados em duas dimensões, tal como se pode verificar na Figura 40.

A expressão que caracteriza a rotação está apresentada em (34), onde β diz respeito ao ângulo que se pretende rodar o sistema, sendo que um ângulo positivo implica uma rotação no sentido anti-horário e um valor negativo provoca uma rotação do sentido dextrogiro.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (34)$$

A Tabela 3 descreve o valor de β consoante o rumo do troço e a Figura 39 ilustra um exemplo esquemático da rotação dos perfis.

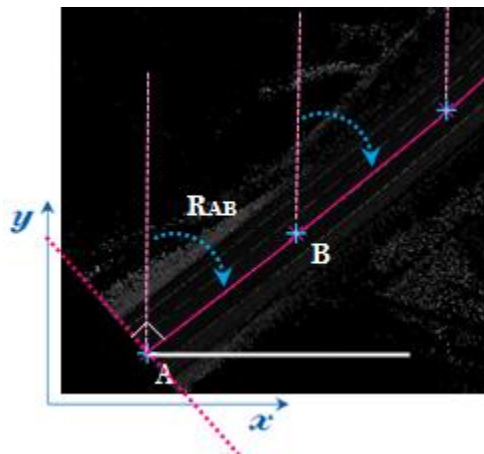


Figura 39 – Exemplo esquemático da rotação dos perfis.

Tabela 3 – Ângulos de rotação do perfil consoante o rumo da estrada.

Rumo	β
$0 < R_{AB} < \frac{\pi}{2}$	R_{AB}
$\frac{\pi}{2} < R_{AB} < \pi$	$-(\pi - R_{AB})$
$\pi < R_{AB} < \frac{3\pi}{2}$	$R_{AB} - \pi$
$\frac{3\pi}{2} < R_{AB} < 2\pi$	$-(2\pi - R_{AB})$

3.11.1 Identificação do Limite de plataforma

A metodologia escolhida para a identificação de pontos definidores do limite de plataforma baseia-se no facto da morfologia da faixa de rodagem ser plana, aproveitando-se a sua descontinuidade para se encontrar o limite da plataforma.

Deste modo, começando do interior da faixa de rodagem, onde os pontos *seed* foram marcados, para o exterior da estrada, pretende-se identificar o ponto a partir do qual se verifica que a cota dos pontos seguintes cresce ou decresce sucessivamente e que a diferença de cota entre eles é bastante significativa não correspondendo aos habituais milímetros que se verificam ao longo da zona de pavimento. Esta operação é efectuada duas vezes em cada perfil, uma para cada lado do perfil de modo a se encontrar o limite de plataforma esquerdo e o limite de plataforma direito.

Na Figura 40 apenas está representada a identificação de um limite de plataforma direito. Em cada um dos lados, é, então, realizada uma análise sucessiva de cotas e respectivas diferenças, procurando-se de cinco em cinco pontos consecutivos (este número é suficiente por análise dos dados), desviados iterativamente de um ponto, em que conjunto é que se verificam tais critérios de paragem, ou seja, em que, de ponto para ponto, a cota decresce ou aumenta sucessivamente e onde a diferença de cotas entre o primeiro e o último ponto do conjunto ultrapassa os 0.02 m, em caso de limites de plataforma menos acentuados como é exemplo a Figura 40, ou os 0.06 m para limites mais pronunciados como o representado na Figura 45.

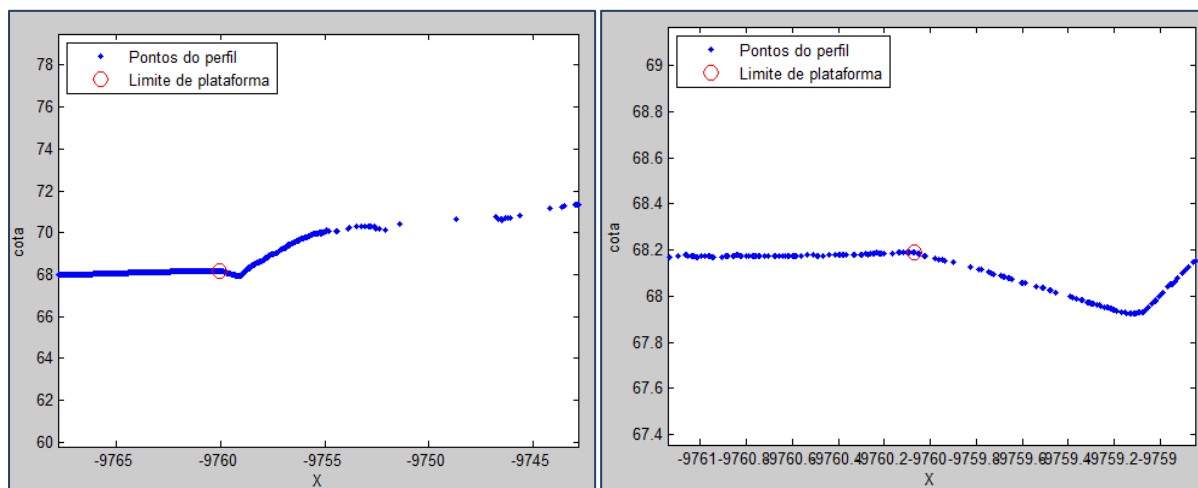


Figura 40 – À esquerda: identificação do limite da plataforma a partir dos pontos do perfil simplificado. À direita: pormenor aumentado do ponto seleccionado sobreposto ao perfil.

Por vezes verifica-se alguma variabilidade nos perfis, observando-se alguns com morfologias menos bem comportadas que a demonstrada na Figura 40, o que vem complicar a detecção desta descontinuidade. Neste sentido, outra condição utilizada na identificação destes pontos consiste no comprimento teórico que a plataforma teria se seguisse os valores definidos pela norma de traçado de perfis transversais.

Deste modo, através da informação cedida pelo utilizador relativamente ao número de vias existentes em cada lado da linha definida pelos pontos *seed* e os valores padrão mencionados em 0 para cada elemento de um perfil transversal, é calculado um comprimento máximo que a plataforma poderá atingir. Este comprimento é, então, determinado, segundo a expressão (35), multiplicando a largura padrão da via de um IC pelo número de vias existentes, somado do comprimento da berma e o comprimento da concordância. Assim, apesar de se saber à partida que na realidade estes valores não são cumpridos à regra aquando do planeamento e construção da estrutura rodoviária, sabe-se que, pelo menos, não serão ultrapassados, de modo que nesta análise serão tomados como valores máximos de tolerância.

Porque num perfil transversal em curva surge um outro elemento denominado sobrelargura que depende do raio de curvatura da estrada e que aumenta a largura da faixa de rodagem, optou-se por somar 0.5 m ao comprimento máximo da plataforma, para que, de uma forma geral, se considere a existência de uma eventual sobrelargura. Pontos detectados a mais deste comprimento máximo da plataforma não são considerados.

$$l_{max_{plat}} = (l_{via} * nvias) + l_{berma} + l_{concordância} + SL \quad (35)$$

A seguinte figura ilustra o resultado do processo de detecção automática dos pontos definidores do limite da plataforma esquerda para um troço.

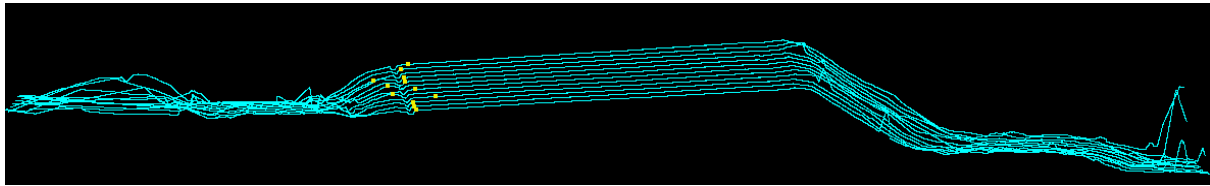


Figura 41 – Pontos detectados como definidores de limite esquerdo da plataforma (a amarelo).

3.11.2 Análise longitudinal do Limite de plataforma

Uma vez obtidos todos os pontos correspondentes a um mesmo elemento rodoviário ao longo dos vários perfis de um troço, neste caso o elemento limite de plataforma, devido à variabilidade de cada perfil no espaço, pois a morfologia das estradas não é perfeita, e à própria indefinição dos pontos definidores que mesmo a olho nu não é exacta a sua marcação, estes nunca são identificados de igual forma, sendo uns melhor reconhecidos que outros. Este aspecto pode ser confirmado pela Figura 42. É, deste modo, importante fazer-se uma análise longitudinal para que se eliminem pontos erradamente identificados.

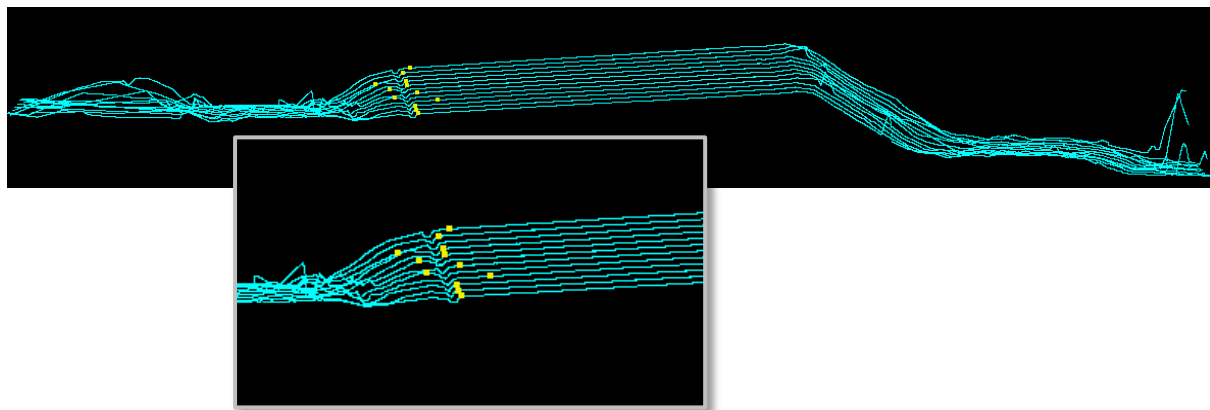


Figura 42 – Variabilidade na identificação dos pontos definidores de perfil para o elemento limite de plataforma (pontos a amarelo).

De modo a diminuir esta variabilidade nos pontos identificados procurou-se fazer uma análise longitudinal, separando-se a componente planimétrica da componente altimétrica. A operação aqui utilizada consiste, então, em duas regressões lineares simples cuja metodologia de análise é demonstrada de seguida.

O objectivo de uma regressão linear é determinar a recta que melhor se adequa a um conjunto de dados, de modo a que os desvios ou resíduos sejam mínimos. Deste modo, pretende-se determinar os parâmetros a e b da equação da recta que minimizem o quadrado dos resíduos, isto é, que minimizem o quadrado da distância de cada ponto amostral (x_i, y_i) ao respectivo ponto $(x_i, a + bx_i)$ projectado na recta, dado pela expressão (36), onde \bar{y} corresponde ao valor aproximado de y calculado a partir dos parâmetros a e b determinados (Souza, 2000).

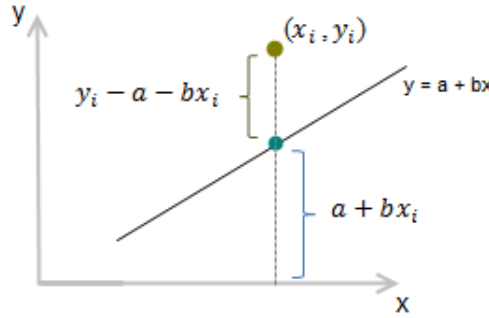


Figura 43 – Representação esquemática de uma regressão linear.

A distância entre os dois pontos da Figura 43 é $|y_i - a - bx_i|$ pelo que, a soma dos quadrados dessas distâncias é dada pela expressão (36).

Os candidatos a ponto mínimo da função q são aqueles para os quais são nulas as derivadas parciais de q em relação a cada um dos parâmetros a e b .

$$q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (36)$$

Satisfeita a condição de minimização da função q , encontra-se o sistema de equações normais que conduz ao melhor ajuste da recta aos pontos, expressão (37).

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial b} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} na + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) b = \sum_{i=1}^n y_i \\ \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) b = \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{cases} \quad (37)$$

Desenvolvendo o sistema anterior em ordem a b e posteriormente em ordem a a , obtêm-se as expressões para a determinação dos parâmetros da recta que melhor se ajusta aos pontos.

$$a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n} \quad (38)$$

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (39)$$

Deste modo, para o exemplo da Figura 42, uma situação bastante crítica, na qual os pontos ilustrados a amarelo foram detectados como definidores de limite de plataforma esquerda, será efectuada uma análise planimétrica aos pontos seguida de uma análise altimétrica com os pontos que se mantiveram da primeira análise, de modo a eliminar os pontos erradamente detectados.

Assim, em cada troço, para cada conjunto de pontos identificados como limite de plataforma é sempre feita uma análise planimétrica dos pontos, seguindo-se uma análise altimétrica dos pontos que se preservaram da primeira análise. Para a análise planimétrica, com uma tolerância de 0.05 m, analisam-se todos os desvios, quer positivos quer negativos dos pontos à recta de regressão, permitindo que a ocorra variação para ambos os lados da recta, gráfico esquerdo da Figura 44. A cada ponto eliminado que está a uma distância da recta superior à tolerância é efectuado novo ajuste, parando o processo assim que todos os desvios estiverem dentro da tolerância estipulada. Para a análise altimétrica entrarão apenas os pontos que se mantiverem da análise planimétrica.

No caso altimétrico, dispondo a altimetria dos vários pontos identificados em cada perfil ao longo do troço em função da sua cardinalidade como mostra o gráfico direito da Figura 44, denota-se o declive positivo da estrada ao longo da sua direcção, pois de perfil para perfil a cota do ponto identificado é sempre superior à dos pontos anteriores. No caso de limite de plataforma, porque esta pode derivar para talude de escavação ou valeta ou para talude de aterro, serão analisados todos os desvios altimétricos, quer positivos quer negativos. O mesmo processo é realizado estabelecendo-se uma tolerância também de 0.05 m e efectuando-se novo ajuste a cada ponto eliminado cujo desvio ultrapassa a tolerância.

No caso de valeta como será mostrado adiante, aquando da análise altimétrica, apenas os desvios altimétricos positivos serão analisados.

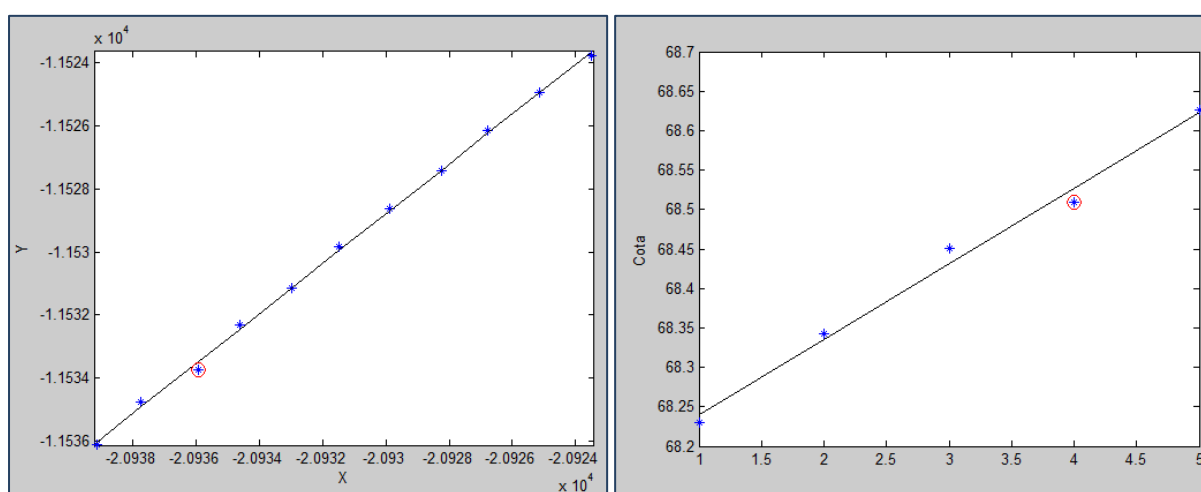


Figura 44 – À esquerda: ajuste linear altimétrico dos pontos identificados. À direita: ajuste linear planimétrico dos pontos identificados.

A Figura 45 pretende ilustrar o resultado da análise longitudinal representada pela Figura 44. De todos os pontos amarelos identificados como definidores do limite de plataforma, apenas os vermelhos se mantiveram após a análise longitudinal, estando demonstradas apenas as primeiras rectas de regressão das análises planimétrica e altimétrica nos gráficos esquerdo e direito da Figura 44, respectivamente.

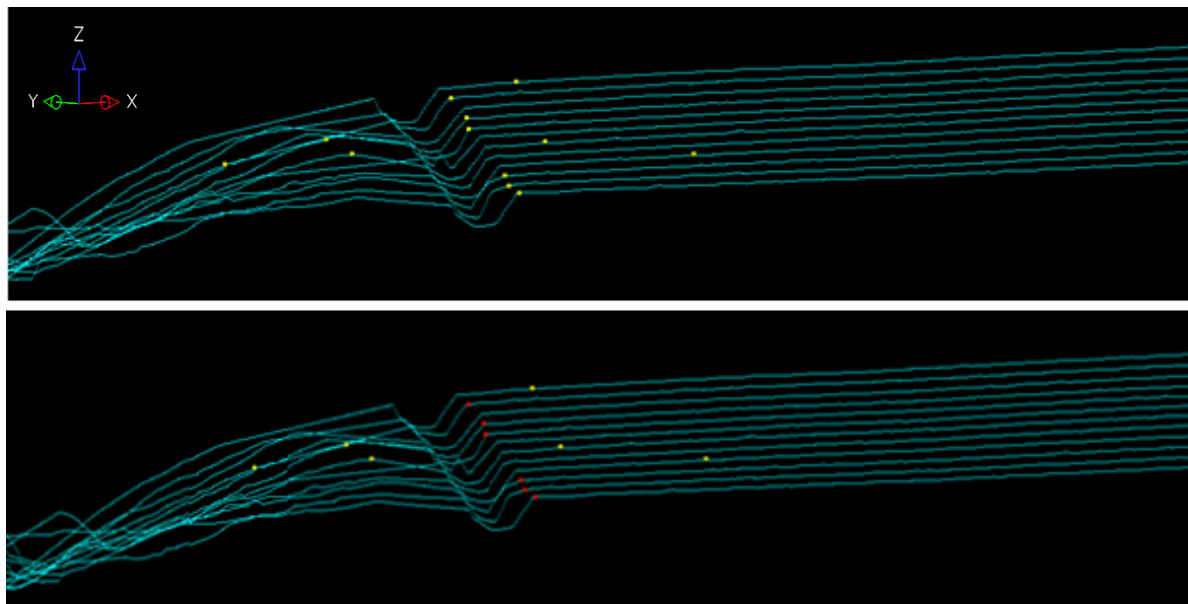


Figura 45 – Em cima: pormenor aumentado da Figura 42. Em baixo: exemplo ilustrativo do resultado da análise longitudinal para o limite de plataforma da qual só se mantiveram os pontos a vermelho.

3.11.3 Identificação da Valeta

Os pontos definidores de valeta que se pretendem detectar correspondem ao ponto mínimo, de menor cota, da zona de drenagem de cada perfil transversal. Estas zonas são caracterizadas por uma forma triangular ou simplesmente côncava, pelo que o ponto que se pretende definir é o mínimo dessa curva.

Para a identificação dos pontos definidores do elemento valeta experimentou-se aplicar a operação de regressão polinomial de 2º grau em conjuntos de pontos do perfil seguintes ao limite de plataforma identificado no passo anterior. Optou-se por esta operação devido à morfologia típica das valetas, confiando que seria possível identificar o seu mínimo procurando valores de concavidade positiva máximos. Assim, seguindo o mesmo raciocínio da regressão linear, dado o polinómio de grau m pela equação (40), o sistema do ajuste polinomial fica como o representado em (41).

$$f(x) = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \dots + \beta_mx^m \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^m \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{m+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \dots & \sum x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^m & \sum x_i^{m+1} & \sum x_i^{m+2} & \dots & \sum x_i^{2m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i x_i \\ \sum y_i x_i^2 \\ \vdots \\ \sum y_i x_i^m \end{bmatrix} \quad (41)$$

A cada conjunto de 20 pontos seguintes ao ponto de limite de plataforma determinado anteriormente e iterativamente desviados de 10 pontos, são calculados os parâmetros da regressão polinomial de 2º grau, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, para cada conjunto de pontos. Determinados os parâmetros de cada curva gerada a partir de cada conjunto de 20 pontos ao longo de um mesmo perfil, é calculado o ponto mínimo de cada curva e a respectiva concavidade, a partir da primeira e segunda derivadas da função (40). Assim que se obtém um valor de concavidade positiva máximo, o processo pára no conjunto de pontos onde a concavidade da curva seguinte decresce. Interpretando a Figura 46, tomar-se-á, então, como ponto definidor de valeta, o ponto do perfil mais próximo do ponto mínimo da curva ajustada (ponto a vermelho), sendo que, para tal, é necessário calcular as distâncias de cada ponto do perfil ao ponto mínimo da curva de modo a se identificar o ponto do perfil correspondente à menor distância (ponto a verde).

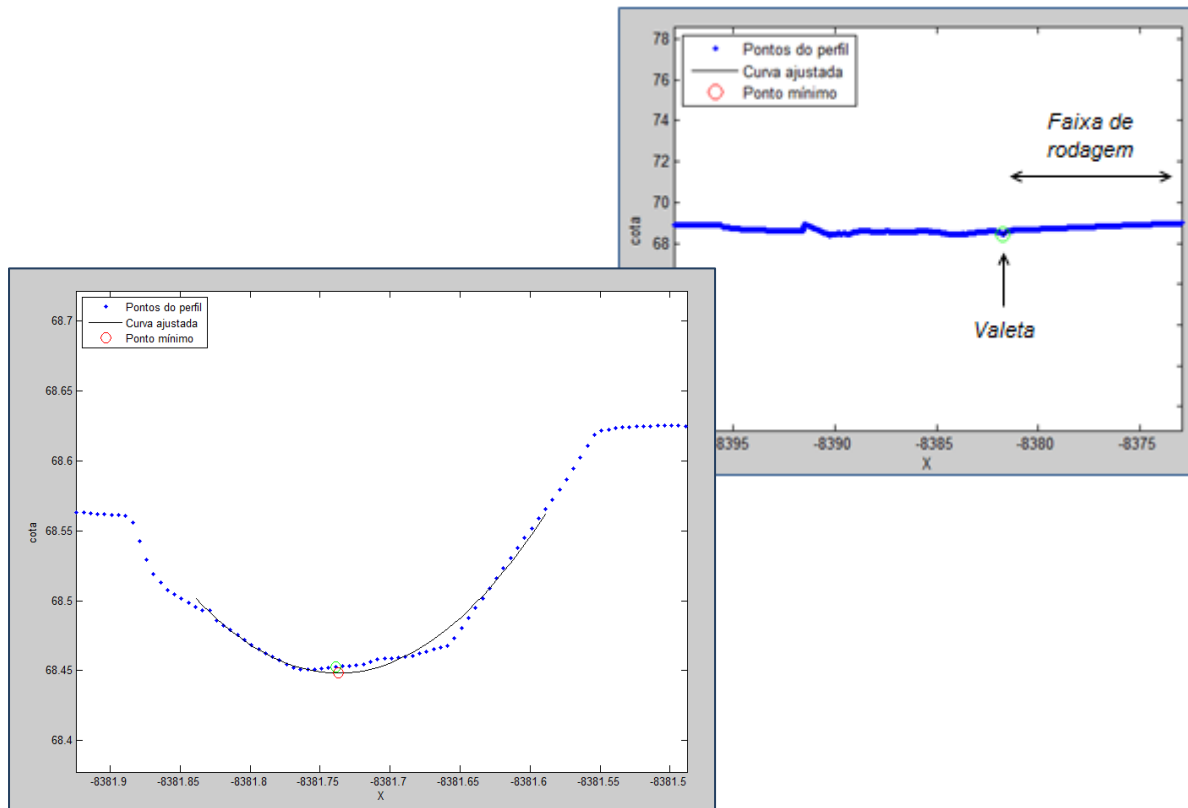


Figura 46 – Identificação do ponto de valeta (a verde) a partir do mínimo da curva ajustada ao perfil (a vermelho) calculada por regressão polinomial.

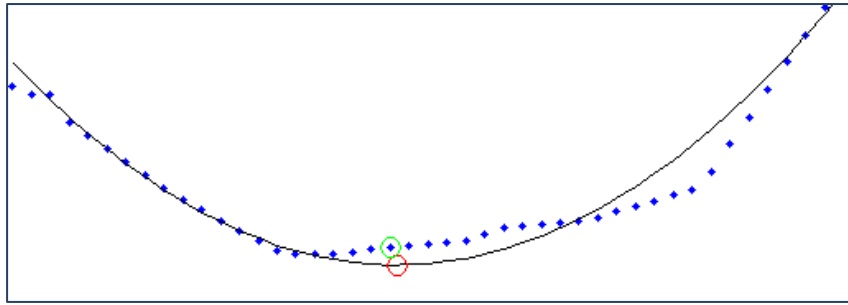


Figura 47 – Pormenor aumentado da figura anterior mostrando o mínimo da curva ajustada (a vermelho) e o ponto do perfil mais próximo deste (a verde).

É importante referir que a determinação da localização dos vários pontos definidores é uma operação algo relativa uma vez que a morfologia das estradas é tão variável que se torna ambígua, mesmo manualmente, a operação de marcação destes pontos. Dois operadores diferentes considerariam certamente, no caso de valeta da Figura 46, dois pontos distintos como pontos definidores de valeta. O mesmo acontece em muitas situações de marcação de limites de plataforma em que os perfis apresentam um comportamento bastante variável, que dois técnicos assinalariam os limites de plataforma em pontos diferentes. É importante frisar, então, que sendo dúbia à partida uma operação realizada manualmente, mais complexo será automatizá-la.

Quanto a distâncias de tolerância para a existência de valeta, definiu-se que um ponto identificado como ponto de valeta a mais de 2 metros, em x , do respectivo ponto de limite de plataforma identificado no passo anterior não é levado em conta, considerando-se, neste caso, valeta inexistente.

Outro formato de valeta, mas que no qual o resultado da aplicação da metodologia é também aceitável, é o ilustrado na seguinte figura consistindo a imagem da direita num aumento do pormenor da imagem da esquerda.

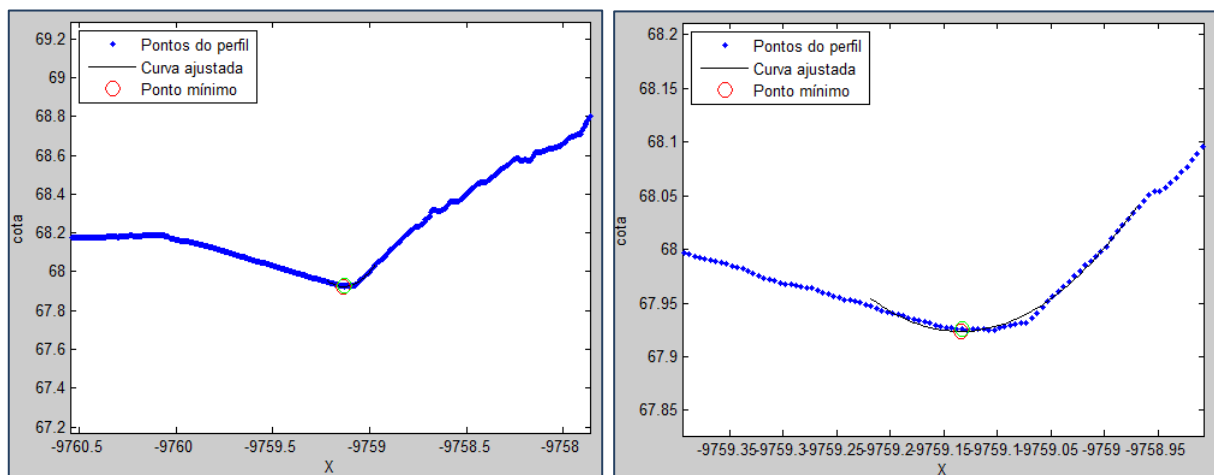


Figura 48 – Detecção do ponto definidor de valeta.

3.11.4 Análise longitudinal da Valeta

Perante um conjunto de pontos identificados como pontos definidores de valeta ao longo dos vários perfis de um mesmo troço, será realizada de igual modo uma análise planimétrica dos pontos seguida de uma análise altimétrica, para que pontos erradamente detectados não sejam considerados aquando da geração das linhas finais definidoras da estrutura rodoviária valeta. Quando se trata da análise longitudinal dos pontos identificados como valeta, o processo é exactamente o mesmo que o descrito no ponto 3.11.2, apenas com a diferença de que no ajuste altimétrico os desvios analisados consistirão apenas nos desvios altimétricos positivos, já que se pretende manter os pontos com cotas inferiores correspondentes aos mínimos das valetas. Na Figura 49 são demonstrados todos os pontos identificados como definidores de valeta pelo processo descrito em 3.11.3, estando ilustrados a vermelho os pontos mantidos após a análise longitudinal e a amarelo os eliminados.

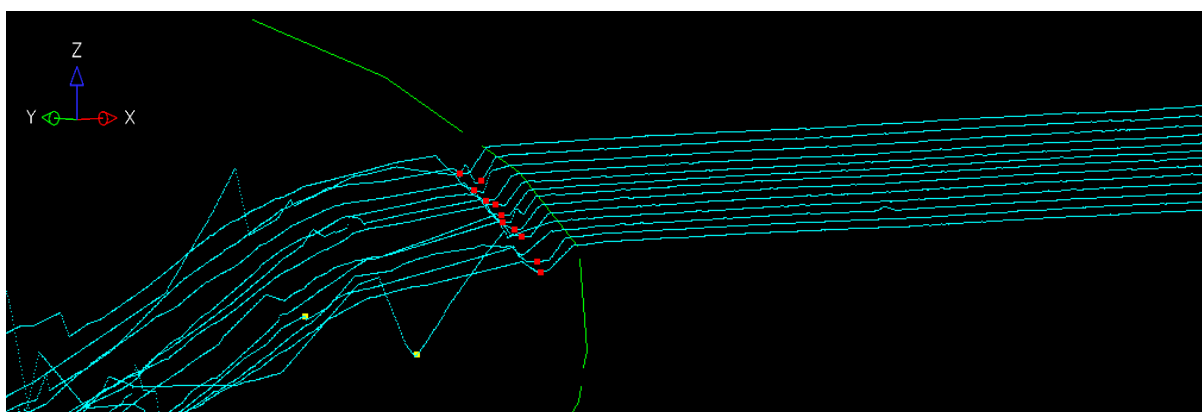


Figura 49 – Eliminação dos pontos a amarelo através da análise longitudinal dos pontos identificados como definidores de valeta.

3.11.5 Identificação de guias

Quanto à identificação da sinalização horizontal, como já foi referido, os pontos do perfil que definem estes elementos da estrada terão um valor de intensidade bastante acentuado relativamente à sua vizinhança de pontos que se encontram na zona de betuminoso. Tal facto pode ser certificado através da Figura 35 ou observando a Figura 50.

Desta forma, correndo igualmente o perfil do interior para o exterior da faixa de rodagem, tendo como critério de paragem o limite da plataforma identificado anteriormente (pontos a amarelo na Figura 50), pretende-se reconhecer um ponto que defina a marcação longitudinal contínua designada por guia da estrada.

Variando os valores de intensidade entre 0 e 255, sabe-se por análise dos dados que os pontos correspondentes ao betuminoso tomam valores de intensidade que não ultrapassam os 25 ao passo que os valores máximos de intensidade identificados nas zonas de sinalização horizontal encontram-se na ordem dos 50.

Assim, considerando a informação cedida pelo utilizador aquando da marcação dos pontos *seed* relativamente ao número de vias existentes para a direita e para a esquerda da linha marcada, procurar-se-á o ponto de maior intensidade que se encontre a uma distância do respectivo ponto *seed*, correspondente ao número de vias multiplicado pelo comprimento mínimo de uma via.

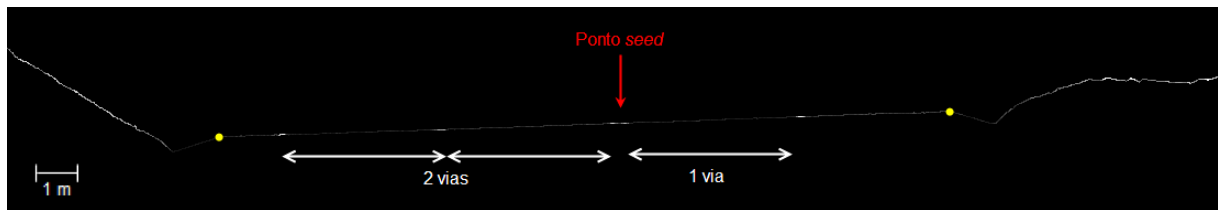


Figura 50 – Estratégia de detecção dos pontos definidores de guias. Pontos a amarelo: limite da plataforma.

4. Resultados e Discussão

De modo a verificar a validade dos pontos resultantes da aplicação da metodologia criada, procurou-se aplicar um operador de relacionamento entre elementos lineares para determinar a distância entre os vectores produzidos pelo método desenvolvido e os obtidos por processos manuais que serão considerados como correctos. Estes elementos lineares considerados como “verdadeiros” foram vectorizados manualmente por operadores técnicos que visualmente identificaram, a partir da nuvem de pontos utilizada neste trabalho, pontos que quebra ou de elevada intensidade (no caso da marcação horizontal) unindo-os de acordo com a componente rodoviária que representam de modo a criar vectores definidores da estrutura rodoviária em questão. Assim, desse trabalho moroso resultaram linhas representativas das guias da estrada, limites de plataforma e valetas ilustradas na Figura 51 pelas linhas a vermelho, verde, lilás, respectivamente.

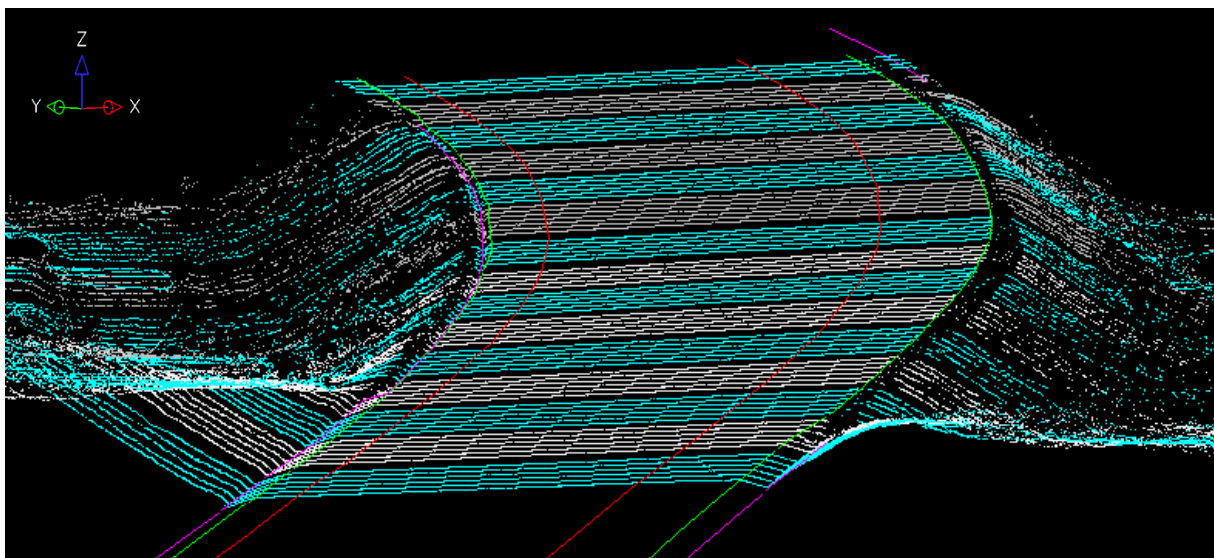


Figura 51 – Perfis simplificados sobrepostos às linhas vectorizadas manualmente sobre o laser.

No projecto de tese em questão procurou-se extrair precisamente esses mesmos elementos de uma forma semi-automática com o propósito de facilitar a tarefa de vectorização. Pretende-se, então, comparar os elementos lineares obtidos manual e semi-automaticamente de modo a que se obtenham resultados quantitativos relativamente à sua proximidade.

A medição de distâncias entre elementos lineares pode ser feita de diversos modos, pelo que o afastamento entre duas linhas pode ser indicado por várias quantidades (Matos, 2008), sendo elas:

- Área compreendida entre as linhas;

- Valor médio da distância entre vértices correspondentes (MDV);
- Valor médio da distância em pontos, vértices ou não, obtidos aleatoriamente (MDA);
- Distância de Hausdorff;
- Distância média entre linhas (MDL).

A utilização do valor da área entre as linhas apresenta como inconveniente o facto de ser dependente da dimensão dos elementos analisados, uma vez que uma maior área não significa necessariamente um maior afastamento.

A medição de distâncias entre vértices correspondentes tem o inconveniente de obrigar a um estabelecimento das correspondências, o que complica bastante o processo de controlo de proximidade entre linhas que foram obtidas por diferentes processos.

A distância de *Hausdorff* trata-se de um algoritmo mais adequado à medição de afastamentos entre linhas no qual essa distância é dada por duas componentes, a distância de *A* para *B* e a distância de *B* para *A* que em geral têm valores diferentes, pelo que se escolhe a maior para ser definida como distância de *Hausdorff*. Estas duas componentes podem ser interpretadas através da Figura 52. A distância de *Hausdorff* apresenta duas propriedades importantes do ponto de vista geométrico, a já referida assimetria, pois $D_{A \rightarrow B}$ é em geral diferente de $D_{B \rightarrow A}$, e a ortogonalidade, ou seja, a distância é atingida em pontos em que o cruzamento da linha original com a linha de distância é ortogonal. As duas propriedades podem ser entendidas através da Figura 52.

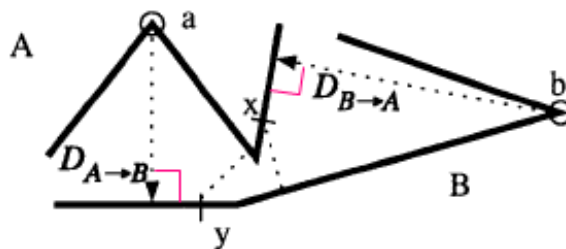


Figura 52 – As propriedades da distância de *Hausdorff*.

Uma terceira propriedade corresponde à sensibilidade na medida em que as extremidades das linhas em análise tornam a distância de *Hausdorff* instável (Hangouet, 1995). Tal propriedade pode ser verificada na Figura 53.

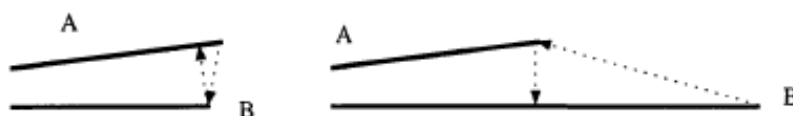


Figura 53 – Ilustração da sensibilidade da distância de *Hausdorff* relativamente às extremidades das linhas em análise.

Esta propriedade é muito importante em processos de análise da proximidade de linhas em trabalhos de generalização cartográfica, no entanto, neste caso não será considerada pois optou-se por uma metodologia na qual as medições nas extremidades de uma linha que ultrapassam os limites da segunda linha são desprezadas. O processo é descrito mais à frente.

No seguinte caso prático, ilustrado na Figura 54, que resultou da análise longitudinal descrita no ponto 3.11, apesar de visualmente se verificar que os pontos de limite de plataforma (pontos vermelhos) foram correctamente identificados, pretende-se medir quão próximos estão estes pontos adquiridos automaticamente da linha verde que resultou da operação de vectorização manual. Assim, de modo a se comparar a linha obtida por este trabalho (pontos a vermelho) e a linha obtida manualmente (linha verde definida pelos pontos a verde), foi necessário segmentar a linha manual segundo os limites da linha automática.

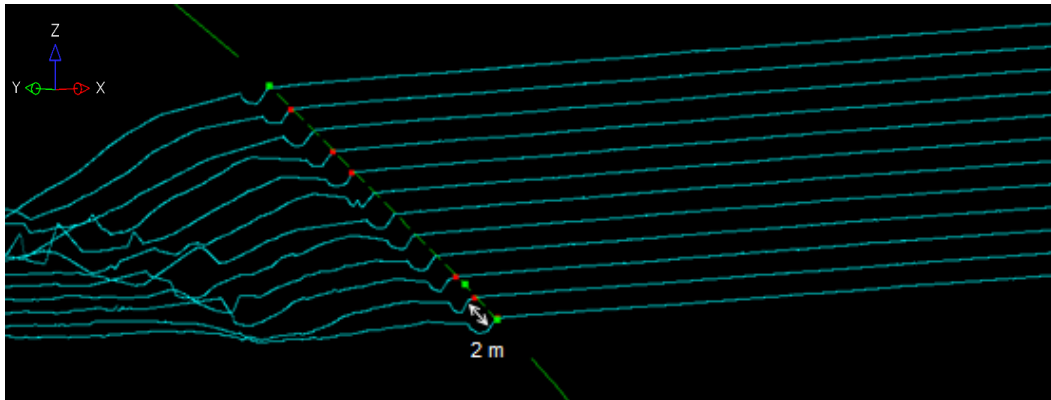


Figura 54 – A linha obtida manualmente (pontos a verde) segmentada segundo os limites da linha obtida automaticamente (pontos a vermelho).

Assim, para a determinação efectiva da distância entre duas linhas, procede-se ao cálculo das distâncias mínimas de cada ponto detectado automaticamente a cada segmento da linha obtida manualmente, e vice-versa. A distância mínima de um ponto a uma recta ocorre exactamente quando se calcula a distância do ponto à sua projecção ortogonal, sobre a referida recta.

A equação paramétrica de uma recta tridimensional é dada pela expressão (42), na qual (X_0, Y_0, Z_0) corresponde a um ponto pertencente à linha, (V_x, V_y, V_z) diz respeito ao vector que define a direcção da recta e t parametriza a posição de (X_p, Y_p, Z_p) ao longo da mesma.

$$P_t = P_0 + t\vec{v} = \begin{cases} X_p = X_0 + V_x * t \\ Y_p = Y_0 + V_y * t \\ Z_p = Z_0 + V_z * t \end{cases} \quad (42)$$

Examinando a Figura 55, dada a recta na forma paramétrica (42), a distância mínima de A à recta realiza-se num ponto A' sobre a recta, de modo a que $\overrightarrow{A'A}$ seja perpendicular a \vec{v} , dado por $\overrightarrow{A'P_0}$ ou por $\overrightarrow{P_0P_1}$.

Segundo (Poole, 2004) sendo que $\overrightarrow{P_0A'} = Proj_v(\overrightarrow{P_0A})$, dado por $\left(\frac{\overrightarrow{P_0A} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2}\right) \vec{v}$, através da propriedade do triângulo rectângulo, $|\overrightarrow{A'A}|^2 = |\overrightarrow{P_0A}|^2 - |\overrightarrow{P_0A'}|^2$, a distância ortogonal de um ponto à recta é dado pela expressão (43).

$$|\overrightarrow{A'A}| = \sqrt{|\overrightarrow{P_0A}|^2 - \left(\left(\frac{\overrightarrow{P_0A} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2}\right) |\vec{v}|}\right)^2} = \sqrt{|\overrightarrow{P_0A}|^2 - \left(\frac{(\overrightarrow{P_0A} \cdot \vec{v})^2}{|\vec{v}|^2}\right)} \quad (43)$$

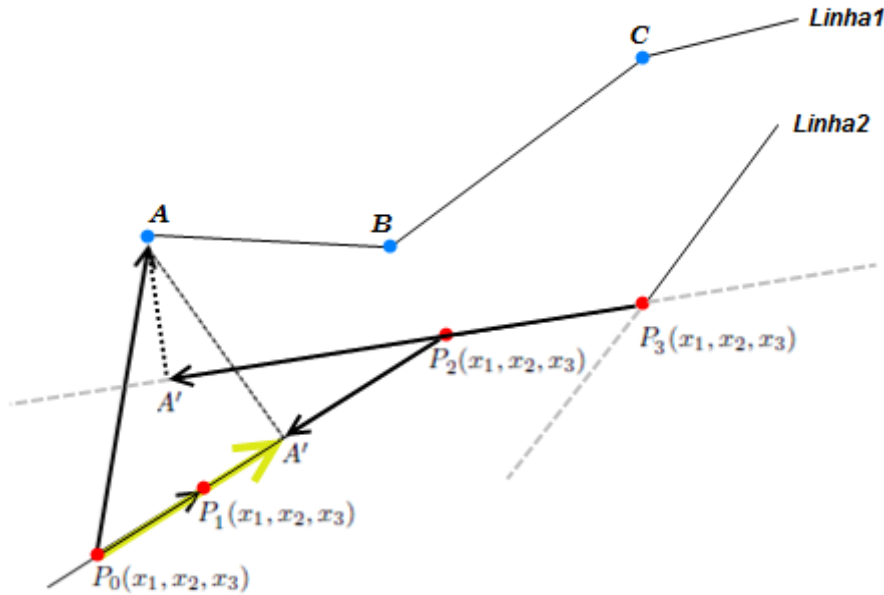


Figura 55 – Distância de ponto à recta.

Deste modo, considerando as duas linhas a comparar como um conjunto de pontos no espaço, denominadas por Linha1 ($L1$) e Linha 2 ($L2$), para determinar a distância $D_{L1 \rightarrow L2}$, para cada vértice de $L1$ procede-se ao cálculo da sua distância a $L2$, ou seja, aos segmentos de $L2$ definidos por cada dois pontos de $L2$. Cada medição de um vértice de $L1$ a cada um dos segmentos de $L2$ devolve um valor de distância ortogonal, pois os dois pontos de cada segmento definem uma recta e como tal, independentemente da localização do ponto, é sempre possível medir-se uma distância mínima do ponto a analisar à recta em questão definida por um segmento. Interpretando a Figura 55, apenas se considera distância mínima quando o comprimento do vector P_kA' é inferior ao segmento em análise P_kP_{k+1} , ou seja, a distância ortogonal de um vértice de $L1$ resultante para cada segmento de $L2$, só é

considerada quando o segmento projectado é inferior ao segmento $P_k P_{k+1}$. Deste modo, no caso de cima, entende-se que apesar da distância ortogonal do ponto A ao segmento $P_2 P_3$ ser menor que a distância directa do mesmo ponto A ao segmento $P_1 P_2$, a distância mínima do ponto A de L_1 à L_2 é dada pela distância ortogonal entre A e $P_1 P_2$ pois nesta situação o comprimento do segmento projectado $P_2 A'$ é inferior ao segmento $P_1 P_2$, já no segmento seguinte o segmento projectado $P_3 A'$ é superior ao segmento $P_2 P_3$, logo esta não será considerada uma distância mínima. Para cada segmento de L_2 , os segmentos projectados dos pontos de L_1 em L_2 são sempre obtidos considerando como ponto de aplicação o ponto do segmento de L_2 que estiver mais afastado do ponto de L_1 em análise.

Obtidas todas as distâncias mínimas de cada vértice de L_1 para L_2 (a azul na Figura 56) e de cada vértice de L_2 para os segmentos de L_1 (a vermelho na Figura 56), determinam-se as distâncias máximas de cada conjunto, obtendo-se $D_{L_1 \rightarrow L_2}$ e $D_{L_2 \rightarrow L_1}$, representadas na Figura 56. Por fim, a distância de *Hausdorff* é dada pelo máximo dessas duas medidas, ou seja, $DH = \max(D_{L_1 \rightarrow L_2}, D_{L_2 \rightarrow L_1})$.

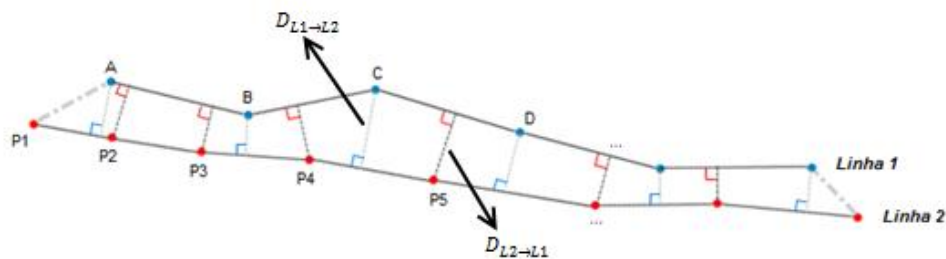


Figura 56 – Determinação da proximidade entre duas linhas.

De modo a avaliar o trabalho realizado até então, pretende-se apresentar as distâncias de *Hausdorff*, e portanto, distâncias máximas, entre as linhas extraídas automaticamente e as correspondentes restituídas manualmente para cada troço do lote de estrada utilizado como objecto de teste neste trabalho. O lote de estrada testado foi dividido em 8 troços através da marcação de 9 pontos *seed*, como se mostra na Figura 20, pelo que, para cada elemento rodoviário esquerdo (E) e direito (D) de cada troço, são demonstrados na Tabela 4 o desvio altimétrico máximo medido entre os vários pontos finais de um mesmo elemento rodoviário à respectiva recta de regressão (Δ_{\max} Alt.), o desvio planimétrico máximo (Δ_{\max} Plan.) e a respectiva distância de *Hausdorff* ($D_{\text{Hausdorff}}$) à linha adquirida manualmente correspondente, ou seja, a distância máxima num conjunto de pontos de um elemento. O campo Média diz respeito à média das distâncias de *Hausdorff* dos restantes pontos de um mesmo elemento.

Associadas à tabela são apresentadas as imagens dos pontos obtidos automaticamente sobrepostos aos perfis e às linhas restituídas manualmente, uma imagem para cada lado de cada troço evidenciando os elementos extraídos em cada lado da estrada, de modo a se visualizar a localização dos pontos relativamente às linhas consideradas correctas.

Tabela 4 – Resultados da avaliação da proximidade dos elementos rodoviários obtidos.

Troço	Elemento	Δ_{\max} Alt. (m)	Δ_{\max} Plan. (m)	D. Hausdorff (m)	Média (m)
1	Guia E	0.011	0.029	0.080	0.058
	Limite plataforma E	0.009	0.036	0.052	0.028
	Valeta E	0.023	0.026	0.048	0.031
	Guia D	0.038	0.041	0.040	0.022
	Limite plataforma D	0.026	0.033	0.080	0.043
	Valeta D	0.020	0.030	0.168	0.073
2	Guia E	0.030	0.041	0.117	0.082
	Limite plataforma E	0.022	0.048	0.070	0.051
	Valeta E	0.029	0.010	0.115	0.101
	Guia D	0.021	0.035	0.059	0.039
	Limite plataforma D	0.029	0.010	0.184	0.086
3	Guia E	0.019	0.037	0.074	0.033
	Limite plataforma E	0.004	0.040	0.060	0.036
	Valeta E	0.027	0.038	0.058	0.023
	Guia D	0.024	0.045	0.120	0.065
	Limite plataforma D	0.035	0.049	0.157	0.089
4	Guia E	0.022	0.031	0.038	0.022
	Limite plataforma E	0.016	0.032	0.073	0.017
	Valeta E	0.007	0.049	0.056	0.022
	Guia D	0.015	0.048	0.121	0.077
	Limite plataforma D	0.013	0.049	0.126	0.090
5	Guia E	0.026	0.025	0.138	0.087
	Limite plataforma E	0.025	0.042	0.139	0.048
	Valeta E	0.008	0.046	0.038	0.021
	Guia D	0.020	0.038	0.10	0.56
	Limite plataforma D	0.016	0.047	0.130	0.063
6	Guia E	0.015	0.046	0.163	0.086
	Limite plataforma E	0.007	0.036	0.062	0.035
	Valeta E	0.027	0.048	0.110	0.038
	Guia D	0.012	0.039	0.098	0.058
	Limite plataforma D	0.035	0.040	0.033	0.023
7	Guia E	0.01	0.01	0.150	0.073
	Limite plataforma E	0.012	0.030	0.071	0.049
	Valeta E	0.013	0.045	0.078	0.055
	Guia D	0.007	0.037	0.059	0.023
	Limite plataforma D	0.047	0.016	0.094	0.045
8	Guia E	0.012	0.050	0.090	0.044
	Limite plataforma E	0.010	0.027	0.080	0.052
	Guia D	0.012	0.020	0.122	0.068
	Limite plataforma D	0.019	0.037	0.069	0.035

Nesta análise, devido à grande variabilidade de morfologias e à própria inconstância verificada de perfil para perfil considerou-se que, para um determinado elemento, uma distância de *Hausdorff* inferior a 0.10 m não é crítica, dando-se especial atenção aos conjuntos de pontos cuja distância máxima à correspondente linha manual é superior e este valor. Deste modo, serão apresentadas imagens dos elementos que na tabela acima apresentam piores resultados de modo a se averiguar a sua razão de ser, isto é, se derivam de uma má localização dos pontos ou se advêm de qualquer outro facto.

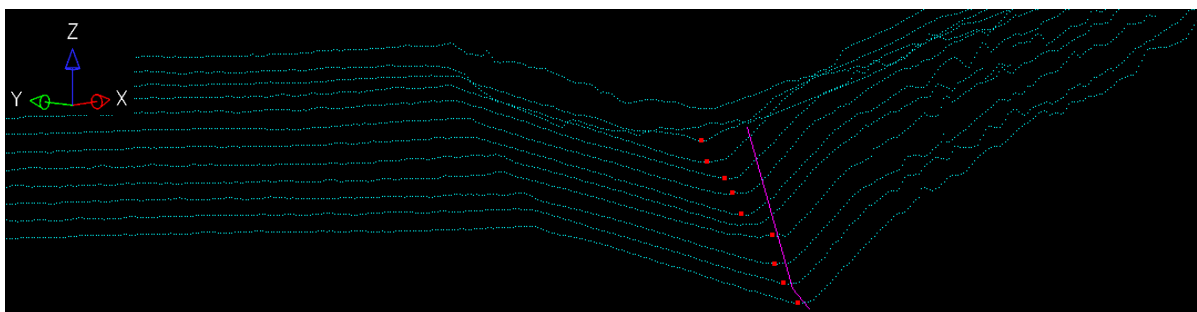


Figura 57 – Valeta direita do troço 1.

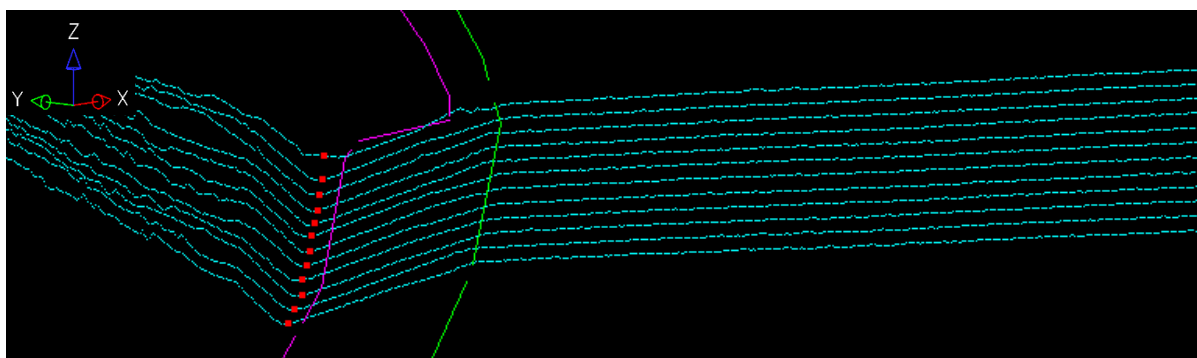


Figura 58 – Valeta esquerda do troço 2.

Relativamente às figuras 57 e 58 associadas ao elemento rodoviário valeta, que apresentam uma distância máxima na ordem dos 0.17 m e 0.12 m respectivamente, considerou-se que a detecção dos pontos definidores foi realizada com êxito e que o mau resultado se deve às linhas vectorizadas manualmente, pois como se pode verificar pela sobreposição com os perfis, os pontos estão localizados exactamente no mínimo de cada valeta ao passo que a linha manual (linha a roxo) apresenta um desvio considerável.

De qualquer das formas os perfis anteriores são relativamente bem comportados sendo a detecção dos pontos definidores realizada com mais facilidade e com maior probabilidade de resultarem pontos definidores correctos. Quanto maior a variação de cada perfil mais difícil será esta detecção e piores serão os resultados como se pode verificar nas seguintes figuras analisando conjuntamente a Tabela 4.

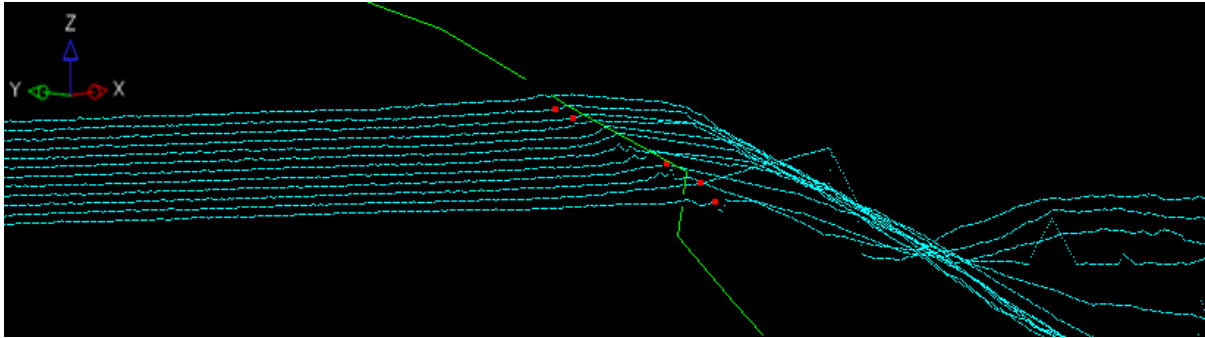


Figura 59 – Limite de plataforma direito do troço 2.

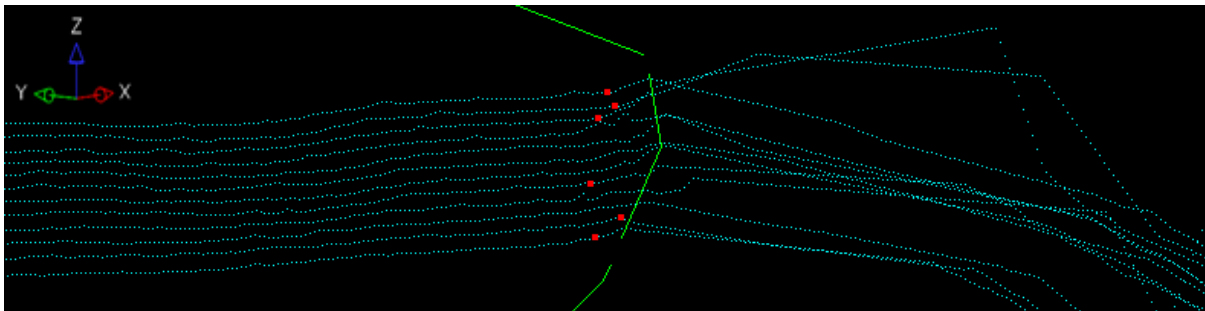


Figura 60 – Limite de plataforma direito do troço 3.

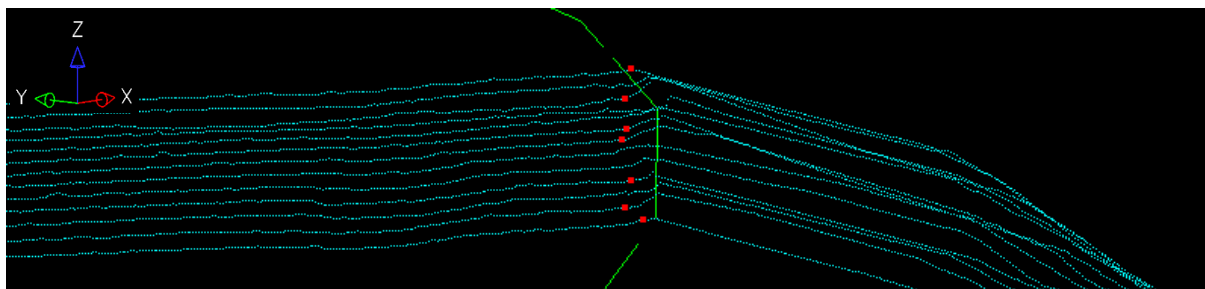


Figura 61 – Limite de plataforma direito do troço 4.

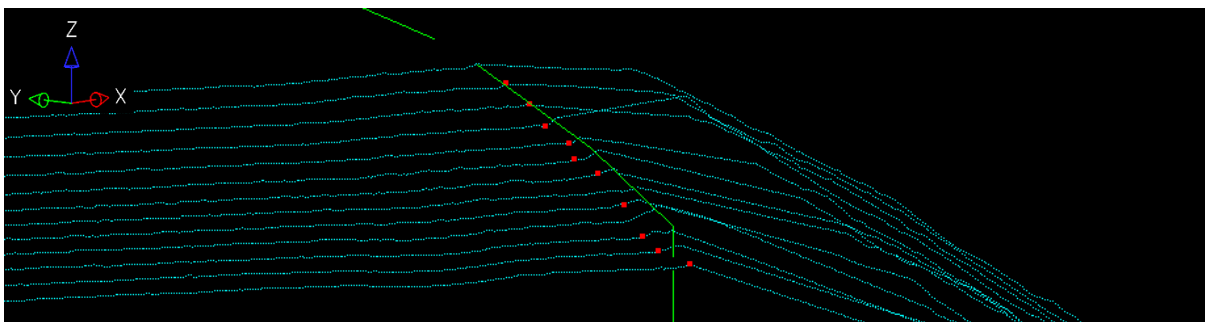


Figura 62 – Limite de plataforma direito do troço 5.

As figuras 59, 60, 61 e 62 dizem todas elas respeito ao limite de plataforma direito, limite este que, como se pode verificar, não é bem definido resultando em distâncias máximas entre os 0.10 m e os

0.15 m. O facto é que devido à enorme variação que cada perfil apresenta, mesmo a vectorização manual não é realizada de igual forma em todos os troços sendo ela própria muito variável. Considera-se que os pontos resultantes apresentam, contudo, uma boa aproximação à localização mais correcta, visto o limite não ser certo aquando da passagem a talude.

Relativamente à Figura 63, apesar da distância máxima superar o valor de tolerância estabelecido considera-se mais um caso bem sucedido na medida em que a linha vectorizada manualmente não passa pelos pontos mínimos das valetas.

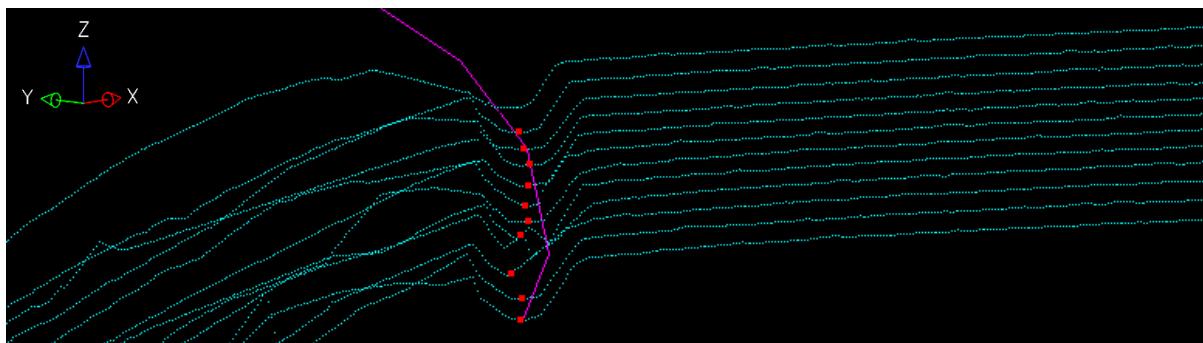


Figura 63 – Valeta esquerda do troço 6.

Como se pode verificar através da tabela, apesar de existirem distâncias de *Hausdorff* críticas nalguns conjuntos de pontos, a média das distâncias de cada conjunto onde a distância de *Hausdorff* é crítica apresenta-se razoável o que significa que as restantes distâncias de cada ponto à linha manual estão dentro de valores aceitáveis.

Quanto às linhas guias, apesar de as distâncias máximas em muitos casos ultrapassar os 10 cm, há que notar que, e como se pode verificar pela Figura 35 e pelos valores normativos descritos em anexo, uma linha guia tem no mínimo 0.10 m de largura, pelo que os pontos resultantes não serão considerados errados apesar de apresentarem algum afastamento relativamente às linhas guias vectorizadas manualmente. A figura seguinte ilustra os pontos definidores da guia resultantes da extracção automática (pontos a amarelo) sobrepostos à linha guia vectorizada manualmente (a vermelho).

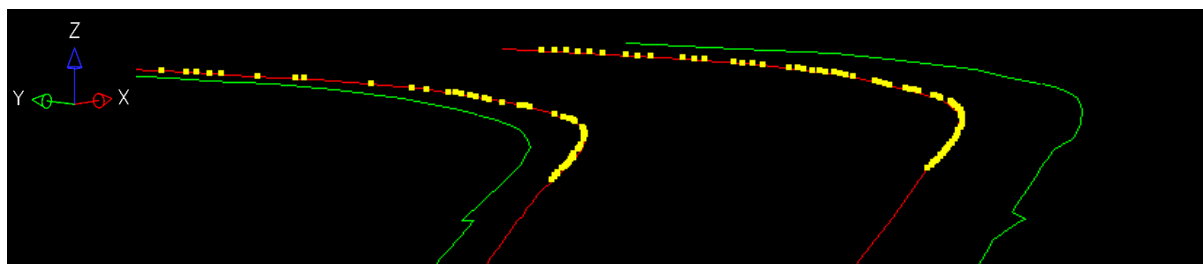


Figura 64 – Sobreposição dos pontos detectados como definidores de guias (a amarelo) à linha obtida por vectorização manual (a vermelho).

Para além das imagens referentes aos piores resultados, são ilustrados seguidamente alguns dos resultados aceites como correctos. É também de referir que os melhores resultados estão naturalmente associados a perfis mais bem comportados e com menos variações, facto que pode ser verificado pelas seguintes imagens.

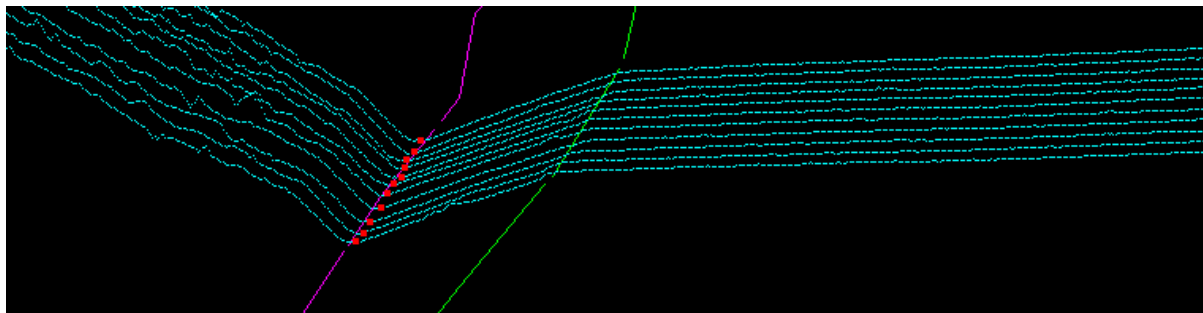


Figura 65 – Valeta esquerda do troço 1.

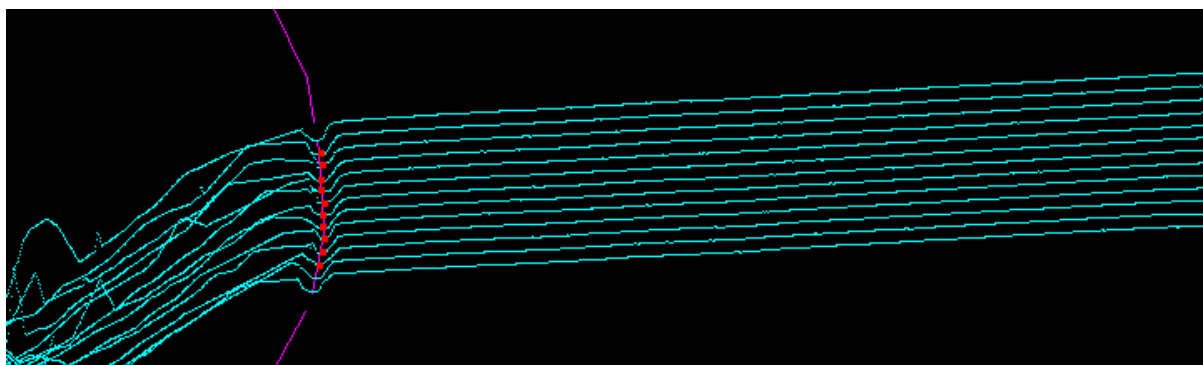


Figura 66 – Valeta esquerda do troço 5.

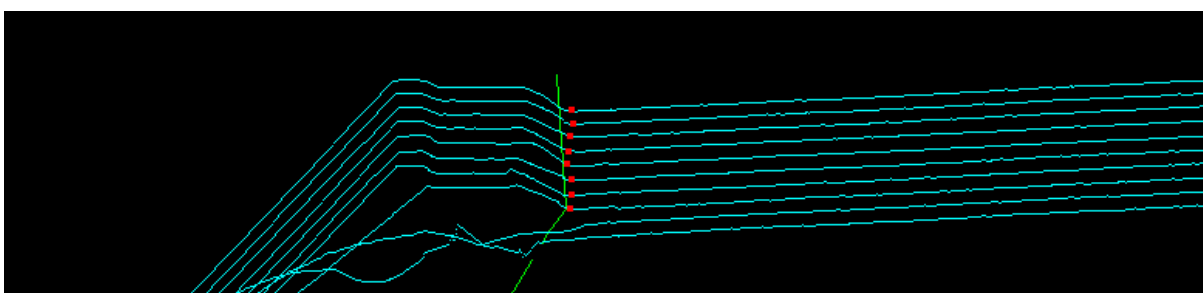


Figura 67 – Limite de plataforma esquerdo do troço 8.

Todos estes pontos ilustrados tridimensionalmente, foram previamente rodados o mesmo ângulo a que foram submetidos inicialmente, mas agora no sentido contrário. Com os pontos obtidos automaticamente de cada elemento definidor da estrada em cada troço, pretende-se criar, para todo o lote, linhas definitivas de modo a que, em ambiente CAD, estas possam ser visualizadas e trabalhadas. Seguidamente são apresentadas figuras das linhas obtidas a partir dos pontos definidores extraídos automaticamente sobrepostas aos perfis obtidos neste trabalho. Estas linhas definidas pelos pontos automáticos resultaram da ligação manual dos pontos em ambiente CAD, no entanto, um passo

seguinte na metodologia seria tornar esta ligação automática. Para além disso, pretender-se-ia suavizá-las de modo a perderem o aspecto anguloso nalgumas ligações, como se pode verificar pela Figura 69.

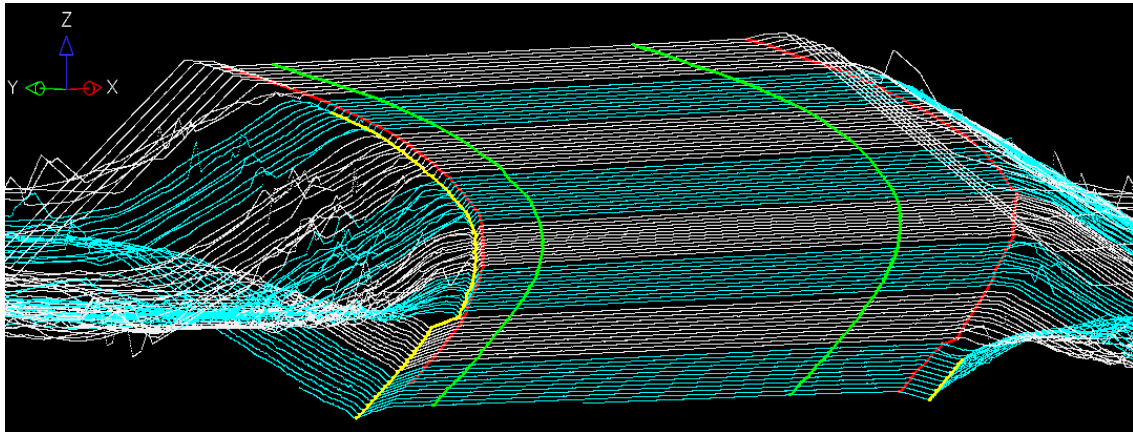


Figura 68 – Ilustração das linhas resultantes da ligação dos pontos obtidos automaticamente (a verde: guias; a vermelho: limite de plataforma; e amarelo: valeta) e dos perfis extraídos pela metodologia. Alternados entre ciano e cinza estão dispostos os 8 troços teste criados.

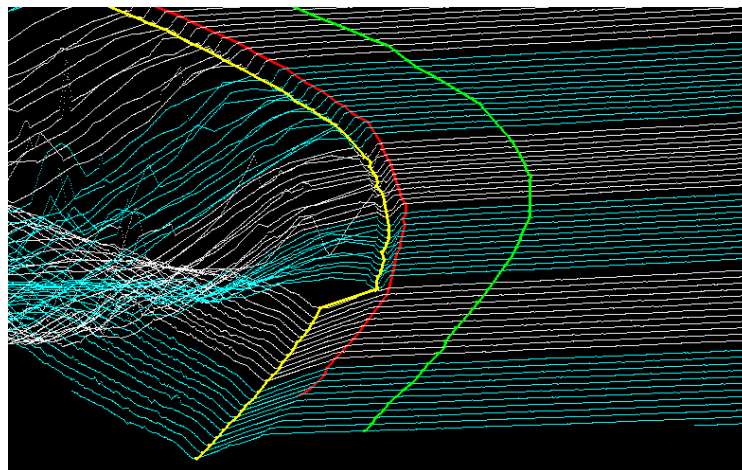


Figura 69 – Pormenor aumentado da figura anterior discriminando a guia, limite de plataforma e valeta esquerdos.

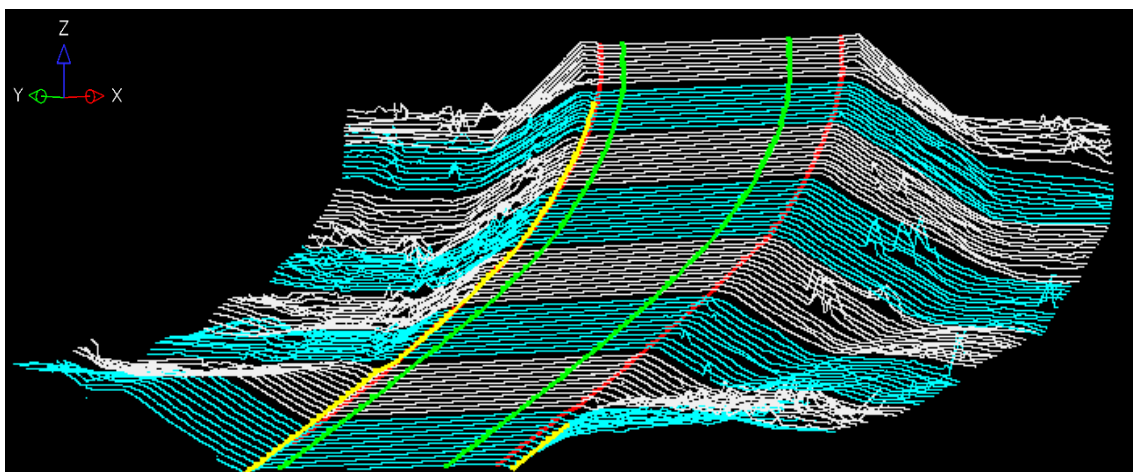


Figura 70 – Perspectiva direita de todo o lote trabalhado.

5. Conclusões e Trabalhos futuros

Apesar da elevada densidade dos dados fornecidos pela tecnologia LiDAR, característica única relativamente a outras tecnologias, a sua propriedade pontual e de irregularidade espacial tridimensional representam um problema na sua manipulação exigindo alguma sofisticação na organização dos dados segundo relações topológicas para que possam ser trabalhados enquanto dados vectoriais.

Através da realização deste trabalho foi possível pôr em prática inúmeras operações geométricas e algoritmos de relacionamentos topológicos, todos eles com um seguimento coerente de modo a se alcançar um objectivo, neste caso a extracção de pontos definidores de perfis rodoviários. Procurou-se sempre trabalhar o mais perto possível dos dados originais de modo a evitar perda de informação aquando da geração de modelos regulares por interpolação.

Assim, tornando a análise mais complexa pois toda ela é feita por uma abordagem vectorial e não matricial, exceptuando a fase inicial de aquisição dos pontos *seed*, tirou-se, contudo, partido das vantagens dos dados vectoriais. No entanto, à parte desta elevada densidade de dados que um sistema LiDAR móvel terrestre proporciona, não é razoável esperar qualquer retorno laser exactamente a partir das linhas de quebra, pelo que o que se obtém são pequenas fiadas muito aproximadas a essas zonas. Deste modo, é natural que exista alguma variação na detecção das *breaklines*. Para além disso, como foi demonstrado ao longo do documento, a variabilidade de cada perfil também torna o processo mais difícil, uma vez que inclusive nas linhas obtidas manualmente se observa alguma subjectividade aquando da escolha dos pontos de quebra ou de mudança de declive, facto ilustrado nas figuras 59, 60, 61 e 62. Nalguns casos é visível a diferença da configuração dos perfis entre troços denotando-se o desaparecimento de alguns elementos, por exemplo do elemento valeta, de um troço para um seguinte. Esta mutabilidade não só dentro de cada perfil mas também entre diferentes perfis ao longo de cada um dos troços torna a automatização da tarefa de identificação dos pontos de quebra mais custosa.

Contudo, considera-se que o objectivo proposto foi alcançado com êxito pois o trabalho que seria realizado manualmente é possível ser efectuado automaticamente em cerca de 1 hora por lote de 200 m. O que antes teria de ser realizado meticulosamente e repetidamente, uma vez que a vectorização teria de ser feita para todas as linhas definidoras de cada lado da estrada marcando-se centenas de pontos por lote, esta metodologia apenas obriga à definição de uma linha orientadora da direcção da estrada e ao fornecimento de informação acerca do número de vias existentes para cada lado dessa linha definida.

Próximos passos de trabalho consistiriam em, como já foi referido, automatizar também a criação de linhas a partir dos pontos detectados automaticamente e a respectiva suavização por funções *spline* por exemplo, ou, eventualmente, por um ajuste linear tridimensional dos pontos obtidos.

Uma outra etapa que exigiria um estudo mais direccionado devido à sua exponencial complexidade e que provavelmente necessitaria do apoio de outras fontes de informação ou de um processo um pouco mais manual que o exigido nesta metodologia, consiste na detecção do elemento que faltou extrair e que garante a correcta definição tridimensional de uma estrutura rodoviária, o talude. Como já foi referido, este elemento exigiria uma abordagem mais cuidada pois não é possível generalizar um processo de identificação como foi minimamente possível no caso do limite de plataforma e valeta. Neste caso, ter-se-ia que explorar processos mais específicos e provavelmente criar vários métodos de detecção de acordo com o tipo de talude encontrado.

Modelar uma superfície e dela extrair informação automaticamente é, de facto, um desafio que quando superado facilita muitos processos morosos. Fazê-lo por abordagens vectoriais torna-se ainda mais interessante pois trabalha-se a verdadeira estrutura tridimensional dos objectos.

6. Referências

- Akel, N. A., et al. 2005. Dense DTM generalization aided by roads extracted from LiDAR data. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005"*. 2005, Vol. 39.
- Apostol, T. M. 1985. *Cálculo com funções de várias variáveis e Álgebra Linear*. Barcelona : Reverté, 1985.
- Axelsson, P. 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. 2000, pp. 110-117.
- Belton, D. e Bae, K.H. 2009. Tracking Roadsides Kerbs in Terrestrial Laser Scanner point Clouds using Principal Component Analysis. *Proceedings of the Surveying & Spatial Sciences Institute Biennial International Conference*. 2009.
- Berg, M., et al. 2008. *Computational Geometry Algorithms and Applications Third Edition*. The Netherlands : Springer, 2008.
- Briese, C. 2004. Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Turkey, 2004, Vols. 35, B3.
- Burkardt, J. 2010. *Computational Geometry Lab: Barycentric coordinates in Triangles*. Virginia : s.n., 2010.
- Câmara, G. e Felgueiras, C. 2007. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. 2007.
- Clode, S., Kootsookos, P. e Rottensteiner, F. 2004. The automatic extraction of roads from LiDAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*. 2004, Vol. 35 (Part B3).
- Cordeiro, E. e Soares, T. 2002. *Algoritmos de Simplificação de Poligonais*. Minas Gerais : s.n., 2002.
- Davis, C. e Queiroz, G. 2001. *Algoritmos geométricos e relacionamentos topológicos*. 2001.
- Habib, A.F., Kersting, A.P. e Ruifang, Z. 2008. LiDAR Strip Adjustment using Conjugate Linear Features in Overlapping Strips. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008, Vol. XXXVII. Part B1.
- Hangouet, J.F. 1995. *Computation of Hausdorff Distance between Plane Vector Polylines*. France : s.n., 1995.
- InIR, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias. 2010. *Revisão da Norma de Traçado*. 2010.

- Kreveld, M. 1996. *Digital Elevation Models: overview and selected TIN algorithms*. Utrecht, the Netherlands : s.n., 1996.
- Martins, E. 2010. *Extração Semi-Automática de Rodovias no Espaço-Objeto: Uso Integrado de um Estéreo Par de Imagens Aéreas e um MDT*. Presidente Prudente : Tese de Mestrado, 2010.
- Matos, J. 2008. *Fundamentos de Informação Geográfica*. s.l. : Lidel, 2008.
- Morin, K. 2002. *Calibration of Airborne Laser Scanner*. Calgary : Tese de Mestrado, 2002. Tese de Mestrado.
- Moura, A. 2006. *Uma Proposta para a Triangulação de Delaunay 2D e Localização Planar de Pontos em OCaml*. Uberlândia : Tese de Doutorado, 2006.
- Pacheco, A., Centeno, J. e Assunção, M. 2011. Classificação de Pontos LiDAR para a Geração do MDT. *Boletim de Ciências Geodésicas*. Jul-Set de 2011, Vols. 17, nº3, pp. p.417-438.
- Poole, D. 2004. *Álgebra Linear*. 2004.
- Rieger, W., et al. 1999. Roads and buildings from laser scanner data within a forest enterprise. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1999, Vol. 32 (Parte 3).
- Sanhueza, J. 2007. *Extração semi-automática de feições planas e cálculo de entidades pontuais a partir dos dados LiDAR para o apoio fotogramétrico*. Curitiba : Tese de Mestrado, 2007. Tese de Mestrado.
- Souza, M. 2000. *Ajuste de Curvas pelo Método dos Quadrados Mínimos*. Ouro Preto : Notas de aula de Métodos Numéricos., 2000.
- Wack, R. e Wimmer, A. 2002. *Digital Terrain Models from Airborne LASER Scanner Data – A grid Approach*. 2002. pp. 293-296.
- Wutke, J. e Centeno, J. 2007. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a LASER. *Boletim das Ciências Geodésicas*. 2007, pp. 151-164.
- Yunjae Choung, B. E. 2009. *Extraction of blufflines from 2.5 dimensional Delaunay triangle mesh using LiDAR data*. The Ohio State University : Tese de Mestrado, 2009. Tese.

7. Anexos

Vias de Comunicação – Perfis Transversais

Um perfil transversal de uma estrada consiste numa representação, num plano vertical normal à directriz, das intersecções deste plano com as superfícies da via e do terreno natural (InIR, 2010). Como principais elementos do perfil transversal das estradas há a considerar: a faixa de rodagem, as bermas, o separador (nas estradas de dupla faixa de rodagem), as concordâncias, as valetas e os taludes de escavação ou de aterro. Neste trabalho pretende-se identificar os pontos que assinalam as guias, o limite de plataforma, o limite inferior da valeta, e eventualmente os taludes. De seguida é feita uma pequena descrição de cada elemento no sentido de expor as características gerais de cada um.

No sentido estrutural, a faixa de rodagem é composta pela largura das vias e da sinalização horizontal, no entanto, em termos de geometria do traçado, considera-se que a largura da faixa de rodagem é dada pela soma da largura das vias. A fim de se assegurar o necessário afastamento entre os veículos pesados adoptam-se vias com 3.75 metros nas estradas com duas vias, classificadas como IP e IC.

Nos alinhamentos rectos a inclinação transversal é normalmente utilizada para efectuar a drenagem das precipitações pluviais pelo que, nas estradas com duas vias, o pavimento é normalmente inclinado para ambos os lados a partir do eixo (perfil em V invertido). Essa inclinação deverá ser de 2.5% nos pavimentos betuminosos e de 2% nos pavimentos de betão em cimento.

As bermas são um refúgio para os veículos avariados, permitem a circulação dos veículos de socorro, e asseguram o suporte lateral do pavimento da faixa de rodagem, devendo preferencialmente ter uma cor e textura contrastantes com as da faixa de rodagem. Nas estradas classificadas como IC as bermas devem apresentar uma largura de 2.50 metros sendo que, para além da berma pavimentada, há a considerar uma zona não pavimentada exterior a esta de 0.75 m, o que perfaz uma largura total de berma de 3.25 m. A ligação entre a berma e o talude ou valeta designada por concordância deve medir 0.60 m.

As valetas destinam-se a colectar e a conduzir as águas superficiais para fora da estrada devendo por isso ser convenientemente dimensionadas para os caudais a escoar. Instalam-se entre as bermas e os taludes de escavação e, de uma maneira geral, a sua geometria deve ser triangular.

Um talude é a superfície de terreno que se localiza junto da estrada e pode ser de origem natural ou artificial. Os taludes artificiais são criados durante a construção da estrada e identificam-se como resultantes de corte ou aterro no terreno. As inclinações dos taludes de escavação e de aterro são

definidas em função de resultados dos estudos geológicos e geotécnicos e têm como função garantir a estabilidade natural do terreno, sendo a sua geometria bastante variável consoante a estabilidade do terreno.

As marcas longitudinais são linhas apostas na faixa de rodagem, separando sentidos ou vias de trânsito apresentando larguras de traço definidas. A largura mínima das linhas longitudinais, contínuas ou descontínuas, é de 0.10 m, no entanto, o valor normalmente utilizado é 0.15 m. A largura das linhas utilizadas na separação de uma via normal de uma via de aceleração ou de abrandamento é, no mínimo, o dobro da que se utiliza para a marcação de uma via normal.

As dimensões especificadas pelas disposições normativas para o traçado dos perfis transversais de vias de comunicação do tipo IC estão ilustradas na Figura 71 apesar de, neste trabalho, consistirem meramente em valores de apoio ao estabelecimento dos critérios de tolerância aplicados nas análises realizadas no algoritmo desenvolvido.

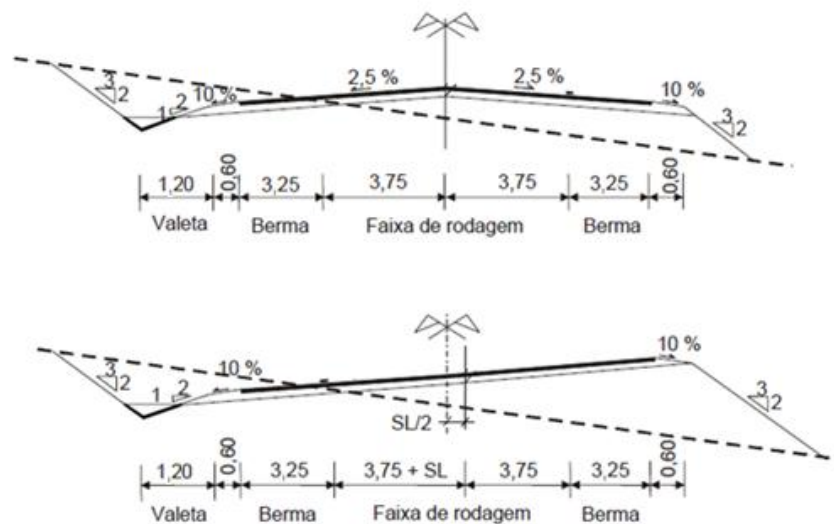


Figura 71 – Em cima: perfil transversal em recta. Em baixo: perfil transversal em curva.